



Universidade de Aveiro Departamento de Química

Ano 2014/2015

Ruben Joel

Ferreira dos Santos

**Instrumentação e automação de
unidades experimentais nos Laboratórios
de Engenharia Química da UA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, realizada sob a orientação científica do Doutor Francisco Avelino Silva Freitas, Professor Auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro e do Doutor Pedro Jorge Marques de Carvalho, estagiário de Pós-Doutoramento do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

“The right man in the wrong place can make all the difference in the world”

O júri

Presidente

Prof^a. Doutora Maria Inês Purcell de Portugal Branco
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Francisco Avelino Silva Freitas
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira
Prof. Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Queria agradecer ao meu orientador Prof. Francisco Avelino e coorientador Pedro Carvalho por toda a ajuda prestada ao longo da execução desta dissertação.

Gostaria também de agradecer às seguintes pessoas pela sua contribuição direta nesta dissertação: Ana I. Caço, Celina Oliveira, Cláudia Santos, Dina Solange, Oriana Martins, Pedro Rodrigues, Raquel Neves e Ricardo Fernandes.

Por fim, gostaria também de agradecer às seguintes pessoas pela sua amizade, ajuda e apoio prestado durante todo o meu percurso académico: Ana Quaresma, Joaquim Rodrigues, Jorge Leite, Mara Pinto, Mariana Amândio, Nádía Ferreira, Pedro Madureira, Pedro Martins, Rita Lemos, Sofia Vieira, Tânia Simões e Tiago “Zizu” Azevedo.

Palavras-chave

Instrumentação; Automação; Controlo; Controladores Lógicos Programáveis; Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados

Resumo

A importância da instrumentação e controlo tem aumentado drasticamente nos últimos anos graças à necessidade de obter processos cada vez mais eficientes, seguros e economicamente viáveis. Por esse motivo, a automação de processos e controlo eleva-se como um aspeto fundamental na formação de base de um Engenheiro Químico.

Embora sejam lecionadas disciplinas na área de instrumentação e controlo de processos no Mestrado Integrado em Engenharia Química da Universidade de Aveiro, a aplicação e estudo prático da instrumentação, automação, processamento de sinais e controlo de processos ainda é bastante reduzido. Com o intuito de disponibilizar uma formação avançada aos alunos nos temas em análise, foram identificadas atividades laboratoriais que posteriormente foram alvo de automatização, tendo sido dimensionadas as unidades de aquisição e controlo e projetadas as interfaces de aquisição e controlo de sinais. Com o intuito de testar estes sistemas foram analisados casos de estudo, nomeadamente a determinação da curva DTR de um reator tubular, estudo da dinâmica de dois tanques num processo de descarga, monitorização e controlo de uma unidade de pasteurização e recuperação de solventes por destilação batch, onde se efetuou a monitorização e tratamento da informação recolhida, bem como a simulação e modelação dos processos tendo-se obtido resultados satisfatórios, encorajando a aplicação destes modelos no desenho e análise de atividades laboratoriais.

Keywords

Instrumentation; Automation; Control; Programmable Logic Controllers; Supervisory Control and Data Acquisition

Abstract

The importance of instrumentation and control has dramatically increased in the last years due to the need of safer, more efficient and economically viable processes. Thus, process automation and control stands as a key element on Chemical Engineering Student's basic academic formation.

Although Instrumentation and Control courses are part of Universidade de Aveiro's MSc in Chemical Engineering, the implementation and analysis of instrumentation, automation, signal processing and process control is still very limited. In order to provide advanced training in the aforementioned subjects, several experimental activities were subject to the process of automation and design of signal acquisition and control units and their supervisory control and data acquisition software. In order to test these systems, several case-studies were conducted and analyzed, with good results, by means of data monitorization and processing, process modelling and simulation, namely the determination of the RTD curve for a tubular reactor, analysis of the system dynamics for a tank's discharge process, monitorization and control of a pasteurization unit and solvent recovery through batch distillation, encouraging the application of said models in the design and analysis of laboratorial practices.

Índice

1 – Introdução	1
1.1 – Objetivos e motivação	2
2 – Instrumentação e Controlo	3
2.1 – Instrumentação e Controlo no âmbito dos laboratórios de Engenharia Química	4
2.1.1 – Reator tubular e determinação de tempos de residência	4
2.1.2 – Armfield® PCT23 e estudo de dinâmica de sistemas	6
2.1.3 – Coluna de destilação de pratos em operação descontínua	8
2.2 – Sistemas de Supervisão e Controlo (SCADA)	9
2.2.1 – Controladores lógicos programáveis: caracterização e aplicações	10
2.2.2 – Interfaces Homem-Máquina	11
2.2.3 – Protocolos e Sistemas de Comunicação	11
3 – Reator Contínuo Tubular	12
3.1 – Equipamento experimental	12
3.2 – Condutímetro Crison® GLP31	13
3.2.1 – Caracterização do sensor	14
3.3 – <i>Software</i> disponível	18
3.3.1 – Crison® ComLabo Easy	18
3.3.2 – LABeq Lab Suite: modulo condutímetro (LabCE)	18
3.4 – Caso de estudo: Determinação da Curva E(t) de reator tubular	19
3.4.1 – Modelação do reator	19
3.4.2 – Resultados experimentais	21
3.5 – Conclusão	25
4 – Unidade laboratorial de pasteurização Armfield® PCT23™	26
4.1 – Equipamento experimental	26
4.1.1 – Consola de Controlo	27
4.1.2 – Sinais elétricos no equipamento	30
4.2 – Aplicação de PLC na unidade PCT23	32
4.2.1 – SLC500	33
4.2.2 – PLC Beckhoff CX9020	36
4.2.3 – Aplicação do CX9020 na unidade PCT23	37

4.3 – Caso de estudo: Controlo de nível	39
4.3.1 – Modelo de descarga de tanque e simulação em Xcos™	39
4.3.2 – LABeq Lab Suite : Controlo de Nível e Dinâmica de Sistemas (LabDS)	40
4.3.3 – Resultados experimentais	41
4.4 – Caso de estudo: unidade de pasteurização	43
4.4.1 – LABeq Lab Suite: módulo LabPasteur	44
4.5 – Conclusões	45
5 – Coluna de pratos descontínua	46
5.1 – Descrição do equipamento experimental	46
5.2 – Acoplamento do PLC Beckhoff CX9020	47
5.2.1 – Identificação dos sinais elétricos no equipamento	48
5.3 – LABeq Lab Suite: coluna de destilação (LabDestil)	49
5.4 – Caso de estudo: recuperação de solventes	50
5.4.1 – Mapa de curvas residuais	51
5.4.2 – Resultados experimentais	52
5.5 – Conclusões	53
6 – Conclusões.....	54
7 – Perspetivas de trabalho futuro	57
Bibliografia.....	58
Anexos.....	I
A – Modelos matemáticos desenvolvidos	I
A.1 – Reator tubular com escoamento laminar	I
A.2 – Série de reatores em ensaio de introdução por impulso	III
A.3 – Modelo para a descarga de tanques	VI
B – Sinais elétricos nos cabos da unidade PCT23 e coluna de destilação	XII
B.1 – Sinais no cabo IDC37	XII
B.2 – Sinais no cabo Burndy de 24 pinos	XIII
B.3 – Sinais no cabo IDC50	XIV
C - <i>Software</i> Utilizado	XVII
C.1 – Scilab e o módulo Xcos	XVII
C.2 – LabView®	XIX
C.3 – TwinCAT II	XXI

C.4 – Aspen Plus V7.3	XXIII
D- Algoritmos de configuração do PLC	XXV
D.1 – Configuração do PLC no TwinCAT II.....	XXV
D.2 – Comunicação entre LabView e TwinCAT	XXVII
E – Especificações técnicas	XXX
E.1 – Módulo CPU Beckhoff CX9020	XXX
E.2 – EL2624.....	XXXI
E.3 – EL3064.....	XXXII
E.4 – EI4004.....	XXXIII
E.5 – EK1001	XXXIV
E.6 – Fonte de alimentação	XXXV
E.7 – Adaptador IDC50 para CX9020	XXXVII
F – Terminologia usada em contexto de Instrumentação e Controlo	XXXVIII

Nomenclatura

Símbolo	Designação	Unidades
Geral		
A	Área de secção reta de tanque	m^2
C	Concentração de espécie no meio	mol/m^3
E(t)	Distribuição externa de idades	s^{-1}
G(s)	Função de transferência do sensor	Variável ¹
g	Aceleração gravítica	m/s^2
h	Altura	mm; m
K	Ganho do sensor	Variável ¹
K_{exp}	Constante experimental de válvula	mm^5/s
L	Comprimento de tubo	m
M	Magnitude de perturbação	Variável ¹
P	Pressão	bar
Q_V	Caudal Volumétrico	m^3/s
R	Raio interno do tubo	m
r	Posição radial	m
T	Temperatura	°C
t	Tempo	s
t_f	Tempo final	s
\bar{t}	Tempo médio	s
u(r)	Velocidade em função da posição radial	m/s
u	Velocidade de escoamento	m/s
u_{max}	Velocidade máxima	m/s
α, γ, λ	Parâmetros de equação diferencial	
θ	Tempo-morto de processo	s
ρ	Densidade	kg/m^3
σ^2	Variância	s^2
τ	Constante de tempo do processo	s
Índices		
0	Condições iniciais	
A	Referente ao tanque A	
B	Referente ao tanque B	
C1	Referente ao reator CSTR 1	
C2	Referente ao reator CSTR 2	
P	Referente ao reator PFR	
S	Condições de saída	
SOL4	Referente à válvula SOL4	

¹ Depende da natureza do processo

SOL5	Referente à válvula SOL5
Siglas	
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor
DTR	Distribuição de tempos de residência
FOPTD	First-Order plus Time Delay
I/O	Input/Output
IHM	Interface Homem-Máquina
PFR	Plug Flow Reactor
PLC	Programmable Logic Controller
RCM	Residue Curve Map
RPA	Reator perfeitamente agitado
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros do modelo FOPTD para condutímetro	16
Tabela 2 - Valor médio e desvio-padrão para os parâmetros FOPTD determinados	17
Tabela 3 - Tempo de resposta do sensor para várias percentagens de sinal	17
Tabela 4 - Condições operatórias nos testes de determinação da curva DTR	22
Tabela 5 - Parâmetros das curvas E(t) determinadas	23
Tabela 6 – Parâmetros aplicados na simulação do modelo de série de reatores	24
Tabela 7 - Sinais no cabo IDC50 e módulos EtherCAT necessários	37
Tabela 8 – Sinais elétricos no cabo IDC37	XII
Tabela 9 - Sinais elétricos no cabo Burndy de 24 pinos	XIII
Tabela 10 - Sinais analógicos no conector IDC50	XIV
Tabela 11 - Sinais digitais de entrada no cabo IDC50	XV
Tabela 12 - Sinais de Relay e digitais de saída no cabo IDC50	XVI
Tabela 13 - Parâmetros usados no módulo BatchSep para a simulação da coluna de destilação	XXIV
Tabela 14 - Potência requerida por cada módulo EtherCAT	XXXV

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de uma Interface Homem-Máquina.....	11
Figura 2 - Montagem experimental do reator tubular.....	13
Figura 3 - GLP 31 da Crison®	14
Figura 4 - Exemplo de análise de uma curva de reação e determinação dos parâmetros do modelo FOPTD.	16
Figura 5 - Simulação da curva de resposta do sensor face a uma perturbação em degrau unitário.....	17
Figura 6 - Interface Homem-Máquina para o módulo LabCE	19
Figura 7 - Comparação do comportamento da curva $E(t)$ para um caudal de 2.55 ml/s com comportamento de reatores ideais.	21
Figura 8 - Curvas $E(t)$ obtidas em cada ensaio experimental	22
Figura 9 - Diagrama de cálculo para modelo de série de reatores.....	23
Figura 10 - Comparação entre os dados experimentais do primeiro ensaio e os vários modelos de reatores com e sem influência do sensor.....	23
Figura 11 - Comparação entre os dados experimentais do segundo ensaio e os vários modelos de reatores com e sem influência do sensor.....	24
Figura 12 - Diagrama de equipamento e instrumentação da unidade PCT23	27
Figura 13 – Equipamento opcional da unidade PCT23. Do topo para a base: SLC500, PCT20H e consola de controlo.....	27
Figura 14 - Sinais elétricos no cabo DC37	28
Figura 15 - Cabo Burndy de 24 pinos	29
Figura 16 - Unidade de falhas da unidade PCT23.....	29
Figura 17 – Relação entre a voltagem de alimentação e caudal das bombas peristálticas ..	31
Figura 18 - Relação entre voltagem do transdutor de pressão L1 e o nível no tanque A	31
Figura 19 – Relação entre o sinal dos termopares e a temperatura	32
Figura 20 - Sinais elétricos no conector IDC50	34
Figura 21 – Beckhoff CX9020 e cartas de aquisição	36
Figura 22 – PLC Beckhoff CX9020 e módulos disponíveis nos laboratórios (vista frontal e lateral).....	38
Figura 23 – Adaptador IDC50 para CX9020	38

Figura 24 - Interface gráfica do módulo LabDS. À esquerda é apresentado um diagrama do processo e à direita encontra-se o painel de controlo	41
Figura 25 - Processo de descarga do tanque A para o tanque B com SOL4 e SOL5 desligadas	41
Figura 26 - Processo de descarga do tanque A para B com SOL5 ligado (ensaio nº1).....	42
Figura 27 - Processo de descarga do tanque A para B com SOL5 ligado (ensaio nº2).....	42
Figura 28 - Resultados experimentais para controlo de nível de tanque A e resultados de simulação	43
Figura 29- Módulo LabPasteur desenvolvido para monitorização e controlo da unidade PCT23 durante o processo de pasteurização	45
Figura 30 - Equipamento experimental da coluna de pratos	47
Figura 31 - Sinais elétricos no conector DB25 nº1	48
Figura 32 - Sinais elétricos no conector DB25 nº2	48
Figura 33 – Sinais elétricos no conector Centronics de 36 pinos	49
Figura 34 - Interface Homem-Máquina para o módulo LabDestil.....	50
Figura 35 - Diagrama ternário da mistura água-etanol-ciclohexano a 0,994 bar usando UNIFAC como modelo termodinâmico	52
Figura 36 - Temperaturas registadas pelos termopares do reebulidor, prato nº 3 e condensador e resultados da simulação para operação com razão de refluxo de 3	53
Figura 37 - Escoamento de um fluido num tubo em regime laminar	I
Figura 38 – Perfil de velocidades de escoamento de um fluido num tubo em regime laminar em função da posição radial	I
Figura 39 - Esquema de bateria de reatores ideais	IV
Figura 40 - Descarga de um tanque através de um orifício	VIII
Figura 41 – Processo de descarga do tanque A para tanque B	IX
Figura 42 - Esquema de computação do modelo de reator tubular com escoamento laminar com modelo FOPTD do sensor	XVII
Figura 43 – Diagrama de blocos para o programa de simulação da curva E(t) para uma bateria de reatores ideais.....	XVIII
Figura 44 – Diagrama de blocos dos superblocos definidos no programa de simulação da bateria de reatores ideais.....	XVIII
Figura 45 – Programa usado na simulação do modelo de descarga dos tanques	XIX

Figura 46 – Superbloco do programa usado na simulação do modelo de descarga dos tanques.....	XIX
Figura 47 – Exemplo de programa escrito em LabView evidenciando a interface gráfica (topo) e o diagrama de blocos (base).....	XXI
Figura 48 – Uso de TwinCAT na programação do PLC CX9020.....	XXII
Figura 49 – Algoritmo dos protocolos de emergência programados para o CX9020	XXII
Figura 50 - Diagrama de Processo da simulação da coluna de destilação	XXIII
Figura 51 – Diagrama de correspondências entre conector IDC50 e conectores de comunicação com CX9020.....	XXXVII
Figura 52 - Comparação entre Precisão e Exatidão com a analogia do tiro ao arco	XL
Figura 53 - Limites no controlo de nível de um tanque.....	XLI
Figura 54 - Comparação entre sinal registado e sinal com <i>aliasing</i> para taxas de amostragem diferentes.....	XLII
Figura 55 – Digitalização de um sinal analógico.	XLIII

1 – Introdução

No início da 1ª revolução industrial a complexidade dos processos aplicados e a pureza dos produtos obtidos era bastante inferior aos padrões atuais, mas à medida que se foi desenvolvendo a investigação nas áreas da química e da física foram surgindo novos processos que permitiram a obtenção de uma maior gama de produtos e com especificações cada vez mais controladas [1]. Com o aumento da diversidade e complexidade dos processos de produção surgiu a necessidade de implementar instrumentos e metodologias capazes de realizar um acompanhamento em tempo real dos vários parâmetros processuais, que por sua vez permitissem adotar estratégias de controlo capazes de conduzir o processo de uma forma mais eficiente, segura, e em muitas situações tornando os processos economicamente viáveis [2].

Tendo em conta que a viabilidade, eficiência e rentabilidade de um processo está diretamente relacionado com as ações de controlo implementadas e que estas por sua vez dependem, entre outros fatores, do tipo, número, precisão e exatidão dos elementos de medida e da sua respetiva análise, é importante que tanto o dimensionamento inicial do processo como a sua constante atualização e modernização se posicione como um elemento de vital importância na indústria química. Por essa razão tem havido uma procura contínua no aumento da eficiência das técnicas de análise adotadas. Assim, os instrumentos usados são cada vez mais precisos, embora fiquem rapidamente desatualizados. No entanto os pressupostos da instrumentação permanecem inalterados:

- Manter a composição dos produtos dentro de parâmetros de qualidade específicos;
- Reduzir a variabilidade dentro do processo através de medidas preventivas e/ou corretivas;
- Aumentar a produtividade e a segurança na operação, reduzindo também o impacto ambiental;
- Reduzir os custos de operação.

Deste modo, e sendo certo que a importância da instrumentação e controlo tenderá a expandir no decorrer das próximas décadas, torna-se por isso cada vez mais relevante que um Engenheiro Químico domine esta área de conhecimento para que possa desenhar e operar plantas industriais mais modernizadas e eficientes [2]. Por este motivo, a inclusão e

aplicação de instrumentação e controlo no plano curricular do curso de Engenharia Química, nomeadamente em disciplinas curriculares (teóricas e/ou laboratoriais) ou mesmo na sua implementação em projetos de formação avançada, eleva-se como um elemento de extrema importância na formação de base de um Engenheiro Químico [3].

Em contexto laboratorial, e tendo por base a realidade dos laboratórios de Engenharia Química da Universidade de Aveiro, verifica-se que na maioria das atividades laboratoriais os equipamentos usados possuem algum tipo de processamento de sinal, e embora a instrumentação e controlo destes, por parte dos alunos, trouxesse uma mais-valia à sua formação, o que se verifica é que a aquisição de dados ainda é efetuada manualmente pelos alunos desviando a sua atenção quer da análise dos sinais, quer dos fenómenos físicos e químicos que decorrem durante a maioria das atividades experimentais operando em estado transiente [4]. Deste modo, facilmente se verifica que o potencial das atividades laboratoriais pode ser largamente expandido, não só permitindo fomentar o conhecimento no campo da instrumentação e controlo, como de novos conceitos teóricos.

1.1 – Objetivos e motivação

Nesta dissertação proponho-me a proceder à instrumentação e automação de 3 unidades experimentais presentes nos laboratórios de Engenharia Química da Universidade de Aveiro, nomeadamente um reator tubular, uma unidade laboratorial de pasteurização e uma coluna de destilação de pratos perfurados. Neste processo será feita uma análise intensiva das unidades, determinando-se o seu potencial para aplicação de novos instrumentos ou substituição dos instrumentos instalados, de forma a automatizar o processo de monitorização e aquisição de dados nas unidades.

Este documento encontra-se dividido em 4 grandes secções. Na primeira secção, capítulo 2, é feita uma introdução ao tema da instrumentação e automação através de uma contextualização da Instrumentação e Sistemas de Controlo atualmente aplicados em equipamentos dos laboratórios de Engenharia Química, analisando-se algumas atividades laboratoriais e o potencial de aplicação de novas estratégias. De seguida, é analisada a temática dos sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, referenciando-se a sua importância para a indústria e potencial de aplicação em atividades laboratoriais. Nos três capítulos seguintes são apresentados vários casos de estudo de implementação de

instrumentação, estratégias de controlo e sistemas de supervisão. No capítulo 3 é analisada a atividade laboratorial de determinação de curva de distribuição de tempos de residência onde foi efetuada a substituição do condutímetro. No capítulo 4 é descrita a unidade laboratorial de pasteurização PCT23, o seu potencial de instrumentação e controlo, e seguidamente são analisados dois casos de estudo: o controlo de nível e o controlo total do processo de pasteurização. No capítulo 5 é efetuada a análise a uma coluna de destilação de pratos em operação descontínua, a sua automação em termos de aquisição de dados e o aproveitamento da instrumentação aplicada no desenvolvimento de novas atividades laboratoriais.

Em anexo encontra-se também apresentada informação relativa à dedução de modelos matemáticos desenvolvidos no âmbito desta dissertação, bem como informação complementar acerca de *software* desenvolvido e especificações técnicas dos equipamentos usados. Por fim é apresentado um breve glossário de termos relativos ao tema da Instrumentação e Automação.

2 – Instrumentação e Controlo

De todas as áreas de conhecimento aplicadas ao projeto e operação de unidades processuais, a instrumentação posiciona-se como um dos ramos da engenharia de maior importância para um correto funcionamento de um processo independentemente da sua natureza, escala ou complexidade [5]. Na sua essência, a instrumentação corresponde à escolha e aplicação de equipamentos capazes de proceder à recolha e transmissão de informação de variáveis processuais e ao controlo de parâmetros do sistema, daí que a instrumentação e a Metrologia (ciência que estuda as medições) acabam por estar diretamente relacionadas [6].

No desenho de sistemas de medição é necessário ter em consideração uma série de passos [7]:

- Clara identificação da natureza do parâmetro a ser medido;
- Identificação dos possíveis sensores a ser aplicados;
- Seleção dos equipamentos de processamento de sinal;
- Identificação da interface de representação da grandeza medida.

2.1 – Instrumentação e Controlo no âmbito dos laboratórios de Engenharia Química

Em contexto laboratorial, e tendo como referência os equipamentos e atividades experimentais dos laboratórios de Engenharia Química da Universidade de Aveiro, a principal aplicação de instrumentação encontra-se focada na medição e controlo de temperatura, nível, caudal e composição de algumas correntes processuais de vários equipamentos usados em atividades laboratoriais. Existem, portanto, equipamentos presentes no laboratório que se revelam como excelentes casos de estudo de análise da instrumentação aplicada e de possíveis alterações que possam ser efetuadas com o intuito de melhorar os sistemas de aquisição de dados e controlo de variáveis. Neste último ponto destacam-se o reator tubular, a unidade laboratorial de pasteurização Armfield® PCT23 e uma coluna de destilação de pratos.

2.1.1 – Reator tubular e determinação de tempos de residência

Uma das várias atividades experimentais pertencentes ao plano da disciplina de Laboratórios de Engenharia Química II na Universidade de Aveiro é o estudo da hidrólise do Acetato de Etilo num reator tubular contínuo. Nesta atividade laboratorial procede-se, numa fase inicial, à determinação da curva de distribuição de tempos de residência (DTR) através de um ensaio de introdução em impulso usando uma solução corada de hidróxido de sódio (NaOH) como *tracer*, e seguidamente ao estudo da reação de hidrólise do Acetato de Etilo.

Se se registasse o tempo exato que cada molécula se encontra dentro do reator seria possível obter uma distribuição exata dos tempos de residência no reator, no entanto é fisicamente impossível fazer esse acompanhamento. Desta forma, as técnicas que se usam na determinação da DTR baseiam-se numa abordagem estatística aproximada e os resultados obtidos poderão ser ligeiramente diferentes da distribuição real. No entanto, o conhecimento da DTR permite fazer um diagnóstico do padrão de escoamento no reator, desenvolver modelos que traduzam o comportamento do equipamento ou até estimar conversões de reagentes [8].

- **Determinação experimental da DTR**

Uma forma de determinar a distribuição dos tempos de residência é através de um ensaio experimental do tipo estímulo-resposta, no qual se injeta um *tracer* na corrente de alimentação e de seguida procede-se ao acompanhamento da variação de concentração de *tracer* na corrente de saída.

A escolha do *tracer* é um elemento crucial neste tipo de ensaios para que possam ser realizados ensaios com rigor. Para tal é necessário ter em consideração uma série de requisitos do *tracer*, nomeadamente: o *tracer* deve ser inerte, isto é, não deve reagir com a mistura reacional, no entanto em casos especiais podem ser usados *tracers* reativos mas nessa situação é necessário ter em consideração a cinética da reação [9], deve possuir propriedades físicas ou químicas de maneira a que seja fácil proceder à sua deteção na corrente de saída de forma contínua e através de métodos simples de deteção, não deve sofrer decomposição durante a permanência no equipamento nem adsorver ao reator ou partículas sólidas no meio. Além disso, o *tracer* deverá apresentar viscosidade e densidade semelhante à mistura reacional tipicamente usada no reator não alterando por isso o comportamento hidrodinâmico do equipamento.

Os tipos de *tracer* mais comuns são os eletrólitos fortes (i.g. ácidos fortes, cloretos de sódio e potássio, bases fortes) que podem ser acompanhados através de medições de condutividade elétrica e/ou pH, e corantes (i.g. azul de metileno) cuja concentração pode ser acompanhada através de técnicas de fotometria. No caso específico desta atividade experimental optou-se pelo uso de uma solução concentrada de NaOH (~1M) corada com fenolftaleína para que se possa também acompanhar visualmente a progressão do *tracer* ao longo do reator e com isso ter uma perceção do seu comportamento hidrodinâmico dentro do equipamento.

Um outro aspeto importante nestes ensaios é a forma como se introduz o *tracer* no sistema. Uma introdução em impulso ou em degrau são dois casos extremos, mas permitem uma determinação da DTR mais imediata, no entanto é possível fazer a introdução do *tracer* de outras formas desde que se conheça exatamente a forma como é introduzida [8].

A determinação da DTR tem outros usos para além do diagnóstico de desvios à “idealidade” no que toca ao escoamento do reator e eventuais problemas de operação. A previsão de propriedades é um dos tópicos de elevada importância e pode ser efetuada fazendo-se uso da DTR nos casos em que a propriedade a ser determinada depende essencialmente do tempo de residência como por exemplo a conversão de reagentes e a seletividade.

2.1.2 – Armfield® PCT23 e estudo de dinâmica de sistemas

Outra atividade experimental em que se faz uso de equipamento em que já foi aplicada instrumentação e implementados sistemas de controlo é a atividade correspondente ao estudo da dinâmica de um sistema de dois tanques, na qual se acompanha a simulação de um processo de carga/descarga de um tanque com controlo on/off. Nesta atividade experimental são utilizados os equipamentos disponíveis na unidade laboratorial de pasteurização PCT23, sendo o controlo de nível um dos vários casos de estudo que podem ser analisados usando este equipamento.

- **Pasteurização e a sua importância na indústria e no ensino**

Com um aumento exponencial na demanda de comida processada que se tem verificado desde o final do século XX, surge necessidade de desenvolver, dominar e controlar processos de conservação de alimentos, de maneira a garantir a qualidade do produto, manutenção de propriedades organoléticas e o respeito da legislação em vigor [10]. Todas estas exigências requerem um conhecimento total de funcionamento de base das técnicas de conservação, mas também a sua otimização.

Existem várias técnicas de processamento e conservação de alimentos, mas uma das mais conhecidas e aplicadas é a pasteurização, principalmente pela sua associação à indústria dos laticínios. A pasteurização consiste num processo de tratamento de alimentos por ação térmica e que foi descoberto por Louis Pasteur no XIX. Numa pasteurização submete-se o produto a uma temperatura moderada ($< 100^{\circ}\text{C}$) durante um pequeno intervalo de tempo, reduzindo desta forma a carga de contaminantes biológicos como bactérias e enzimas responsáveis pela degradação do produto, e prolongando a durabilidade dos alimentos tratados. Ao contrário da esterilização, não se promove o

extermínio total dos microrganismos presentes, promovendo-se apenas a redução de agentes patogénicos.

Em termos práticos, é possível classificar o tipo de pasteurização em função das condições da operação, nomeadamente em função dos tempos de residência e gama de temperaturas. Assim temos três tipos de pasteurização:

- Pasteurização de baixa temperatura (*Low Temperature Large Time*): operação a temperaturas perto dos 63°C e com tempos de residência na ordem dos 30 minutos. Devido ao elevado tempo de residência este tipo de pasteurização é normalmente efetuado em descontínuo (batch)
- Pasteurização a alta temperatura (*High Temperature Short Time*): operação a temperaturas entre 72 °C e os 90 °C e com tempos de residência bastante curtos, variando entre os 15 segundos para 72 °C e os 0.5 segundos para 90 °C.
- Pasteurização UHT: o termo UHT surge do inglês *Ultra High Temperature*, e é caracterizado por ser um processo a temperaturas na ordem dos 135 °C e com tempos de residência entre os 2 e os 0.5 segundos dependendo do produto a tratar.

Genericamente, e a nível de equipamento, uma unidade de pasteurização é constituída por uma série de tanques de armazenamento (para produto fresco e produto final), uma unidade de permuta de calor que pode variar entre um tanque aquecido e agitado no caso de pasteurização batch, e permutadores de placas ou carcaça e tubos no caso de unidades em operação contínua, uma unidade geradora de fluido quente (se aplicável), sistemas de filtração e homogeneização [11]. Tendo por base o equipamento disponível, verificamos que a maioria destas unidades processuais e sistemas de aquisição de dados e controlo já se encontram aplicados na unidade, encontrando-se descritos no capítulo 4.

Devido à variabilidade processual inerente a este tipo de processos (flutuações no caudal, composição e temperatura dos alimentos a processar) é necessário garantir a existência de um conjunto diversificado de sensores para vários parâmetros processuais como temperatura, nível, caudal ou pressão que permitam acompanhar em tempo real as alterações das variáveis processuais e acoplar sistemas de controlo eficazes que garantam que o produto final contenha as especificações pretendidas e em conformidade com a

legislação em vigor. Por este motivo, uma unidade de pasteurização é um excelente caso de estudo a nível de estratégias de instrumentação e controlo.

2.1.3 – Coluna de destilação de pratos em operação descontínua

A destilação é um dos processos de separação mais importantes na indústria química, sendo a destilação multi-componente em operação contínua um dos processos mais usados industrialmente graças ao seu uso generalizado em refinarias [12]. Face a este ponto, encontram-se disponíveis nos laboratórios de Engenharia Química algumas colunas de destilação com configurações e geometrias diferentes, e que são aplicadas em atividades experimentais de natureza variada, permitindo aos alunos consolidar conhecimentos adquiridos em disciplinas lecionadas previamente. Neste ponto torna-se importante destacar a coluna de pratos operando em regime descontínuo e a sua versatilidade no desenvolvimento de atividades experimentais, estando este equipamento descrito no capítulo 5.

- **Recuperação de solventes por destilação batch**

Um dos maiores problemas que a indústria química tem vindo a sofrer é o aumento do impacto ecológico que o uso de solventes orgânicos acarreta. Considerando o uso generalizado deste tipo de químicos, a legislação vigente e os custos associados, torna-se importante implementar processos que permitam proceder à recuperação e reutilização de solventes orgânicos [13]. Existem alguns processos distintos que permitem a recuperação de solventes tais como a extração líquido-líquido e a destilação, cada um com as suas vantagens e desvantagens. Por exemplo, a extração líquido-líquido permite uma recuperação com menor exigência energética para soluções diluídas, mas necessita de mais um processo de separação (normalmente destilação) para separar o solvente do agente de transferência de massa. Por outro lado, a destilação permite uma operação mais flexível permitindo processar uma gama de misturas mais abrangente mas não pode ser aplicada diretamente em misturas com compostos termodegradáveis, azeótropos ou soluções diluídas [12]. No entanto, devido à versatilidade e maturidade dos processos de destilação, a recuperação de solventes por destilação batch é uma prática recorrente em unidades especializadas na recuperação e regeneração de solventes [14], como as que podemos encontrar nas instalações da EGEO, uma empresa de referência no mercado da gestão global de resíduos.

2.2 – Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

Devido ao avanço científico-tecnológico, aplicação de nova legislação a nível ambiental e de segurança e higiene no trabalho e a necessidade de ser cada vez mais eficientes e economicamente competitivos, as unidades fabris começaram a implementar equipamentos cada vez mais complexos nos seus processos de forma a garantir uma operação mais eficiente e segura [15]. Para atingir esses objetivos é necessário garantir que existe uma constante monitorização e controlo de várias partes e/ou a totalidade de um processo, no entanto verificou-se que a enorme complexidade dos sistemas tornava inviável a aplicação de instrumentação e controlo convencionais nos quais era necessário a supervisão de vários técnicos a fim de monitorizar os vários instrumentos aplicados simultaneamente [16]. Como consequência, começaram-se a implementar sistemas inteligentes baseados em microprocessadores e computadores permitindo uma monitorização, processamento de informação e controlo de um largo volume de dados processuais mais eficientes.

A implementação de um sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) apresenta-se como uma vantagem competitiva face a outros sistemas, uma vez que permite uma operação mais eficiente e autónoma, reduz os custos operatórios, permite a implementação de sistemas de segurança preventivos e ainda serve de base para outros sistemas de avaliação de eficiência produtiva, planeamento e controlo de produção entre outros.

Na prática, um sistema SCADA traduz-se num sistema que opera com informação recolhida por vários sensores num processo e que são transmitidos, através de canais próprios, até equipamentos programados para monitorizar e controlar pontos-chave do processo. Tipicamente, um sistema SCADA é constituído por 6 subsistemas:

- Instrumentação aplicada no processo;
- Sistemas telemétricos e de conversão de sinal;
- Controladores Lógicos Programáveis (PLC);
- Sistema supervisor de aquisição de dados e controlo (Computadores);
- Interfaces Homem-Máquina (*Software e Hardware*);
- Protocolos e sistemas de comunicação entre sistema supervisor e equipamento remoto;

De todos os subsistemas apresentados, torna-se importante destacar o uso de PLC, a interface Homem-Máquina e os protocolos e sistemas de comunicação.

2.2.1 – Controladores lógicos programáveis: caracterização e aplicações

Um controlador lógico programável (PLC) é um sistema de computação baseado em microprocessadores e que faz uso de uma memória programável e não-volátil para armazenar instruções e implementar funções de cariz lógico e/ou aritmético de forma sequencial, com o intuito de controlar equipamentos presentes num determinado processo. Este tipo de equipamento é largamente aplicado na automação de processos (especialmente processos eletromecânicos), apresentando um largo espectro de terminais I/O, analógicos ou digitais, usados no envio e receção de sinais elétricos dos vários equipamentos instalados.

Considerando o tipo de aplicação mais comum destes equipamentos e o perfil dos operadores, um PLC é desenvolvido de maneira a que possa ser aplicado em sistemas cujos operadores possam ter um conhecimento limitado e/ou inexistente nas áreas de eletrónica e programação. Dadas as características de funcionamento de um PLC, estes podem ser aplicados num largo espectro de sistemas de controlo, e na eventualidade de se efetuarem alterações processuais poderá não ser necessário proceder a alterações de controladores e/ou instalação elétrica. Desta forma, os PLC apresentam-se como sistemas de controlo de enorme flexibilidade, economicamente competitivos, podendo ser aplicados em processos de enorme variabilidade e complexidade [7].

Em relação à programação de PLC, uma das linguagens mais frequentemente utilizada é a programação em Ladder. Nesta linguagem as funções lógicas são representadas numa forma análoga aos sistemas elétricos baseado em relés, fazendo uso de lógica booleana para conseguir executar determinadas ações [7]. Embora esta linguagem seja relativamente simples de ensinar a um operador sem conhecimentos de programação, possui algumas desvantagens em relação a outras linguagens uma vez que a sua aplicação em sistemas que operam com sinais analógicos ou em que se tenham de aplicar operações algébricas torna-se altamente complexa e, consequentemente, pouco funcional. Por este motivo surgiram novas linguagens dedicadas à programação de PLC e que se encontram devidamente certificadas na norma IEC 1131-3, nomeadamente a programação em FBD (Function

Block Diagram), IL (Instruction List), SFC (Sequential Function Chart) e finalmente programação em ST (Strutured Text) [17].

2.2.2 – Interfaces Homem-Máquina

Uma Interface Homem-Máquina (IHM) corresponde a um sistema que permite de forma simples e intuitiva que um operador possa ter acesso à informação sobre os vários parâmetros processuais, podendo posteriormente tomar ações de controlo. As IHM estão normalmente ligadas aos Sistemas Supervisores permitindo que haja um acompanhamento em tempo real de todas as variações decorrentes no processo, facilitando o diagnóstico de funcionamento do processo, compilação de dados e a gestão de alarmes [15]. Na Figura 1 encontra-se apresentado um exemplo de uma IHM aplicada a um sistema de queima controlada.

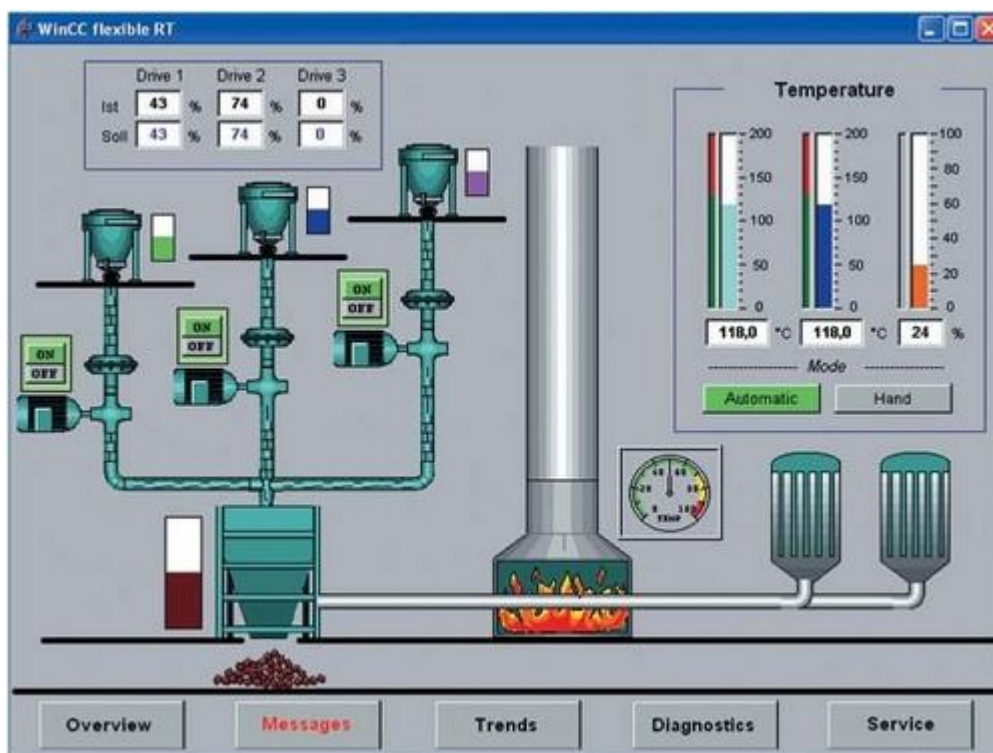


Figura 1 - Exemplo de uma Interface Homem-Máquina. Fonte: Siemens [18]

2.2.3 – Protocolos e Sistemas de Comunicação

Para que a comunicação entre os sistemas SCADA e os autómatos seja possível, é necessária a implementação de sistemas de comunicação compatíveis. No caso específico

dos sistemas SCADA é necessário que haja uma combinação entre uma rede física e protocolos de comunicação.

Em termos de rede física, o meio mais comum é normalmente o uso dos padrões elétricos RS232, RS485 e mais recentemente as redes Ethernet, sendo que esta última tem ganho um maior destaque uma vez que permite a aplicação de cablagem para distâncias superiores aos outros padrões sem perda de sinal e consequente necessidade de usar repetidores de sinal. Para que haja comunicação entre os subsistemas é ainda necessário o uso de protocolos de comunicação, destacando-se os protocolos TCP/IP e padrões de série RS232/RS485 [19].

3 – Reator Contínuo Tubular

3.1 – Equipamento experimental

Para a realização da atividade experimental que visa a determinação da curva DTR, encontra-se disponível no laboratório um reator tubular de 3.2 cm de diâmetro interno e 100 cm de altura disposto verticalmente, uma bomba peristáltica de dois canais e vários tanques de armazenamento de reagentes e efluentes, sendo também usado um condutímetro instalado no topo da coluna para que se possa efetuar a medição da condutividade elétrica da corrente de saída. A montagem experimental encontra-se apresentada na Figura 2.

No caso específico do condutímetro era utilizado um condutímetro portátil Russel modelo RL105, que não possui a capacidade de registar e exportar os dados recolhidos. Esta limitação obrigava o utilizador a registar manualmente os valores de condutividade ao longo dos ensaios efetuados. Além do mais, este condutímetro procede a uma mudança de escala de $\mu\text{S}/\text{cm}$ para mS/cm quando o valor de condutividade ultrapassava os 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo que esta característica induzia em erro o utilizador menos atento. Estas limitações poder-se-iam revelar uma característica com pouco impacto na execução da atividade experimental não fosse o facto de ser necessário proceder à recolha de dados em intervalos de tempo na ordem dos 2 a 5 segundos por forma a ter um conjunto de dados representativo do fenómeno. Como consequência, era necessário haver um operador junto do condutímetro a transmitir o valor da condutividade e do tempo decorrido, enquanto

outro operador registava os dados desviando totalmente a sua atenção de fenómenos físicos e químicos da atividade fenómeno para a recolha de informação.

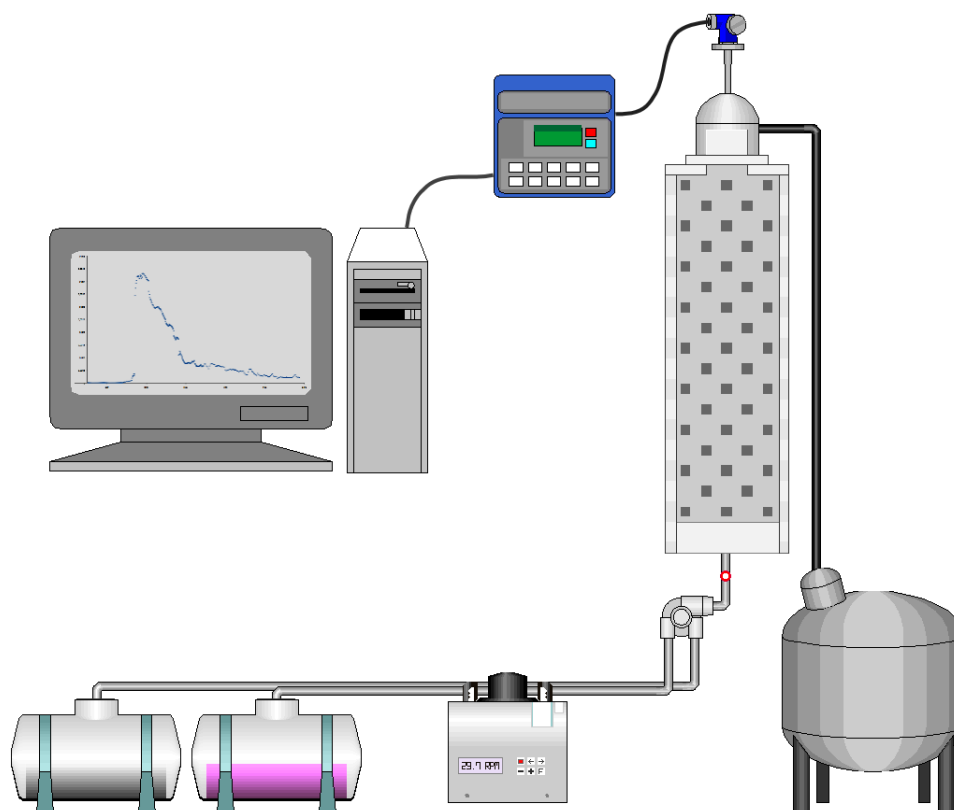


Figura 2 - Montagem experimental do reator tubular

3.2 – Condutímetro Crison® GLP31

Com o intuito de corrigir as deficiências que o condutímetro Russel RL105 apresentava, procedeu-se à aquisição e instalação de um novo condutímetro, o Crison® GLP 31 (Figura 3), que já possui a capacidade de registo e exportação de dados recolhidos, sendo que a comunicação com um computador é efetuada através de uma porta paralela usando o protocolo RS232.

O GLP 31 é um equipamento bastante versátil sendo capaz de registar valores condutividade entre 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ até 1000 mS/cm , efetuar medições da carga total de sólidos dissolvidos (Total Dissolved Solids) até 500 mg/l e a salinidade de uma solução em termos de massa de NaCl por litro de solução para valores entre 5.25 mg/l e 311.1 g/l . Como complemento, este equipamento ainda possui uma memória flash capaz de guardar os últimos 400 pontos medidos bem como a informação acerca da data e hora da medição,

temperatura, agitação e os parâmetros de calibração do sensor, tratando-se assim de uma cópia de segurança que pode ser usada na eventualidade de ocorrer uma falha de comunicação com o computador [20].



Figura 3 - GLP 31 da Crison®

3.2.1 – Caracterização do sensor

Um dos parâmetros a ter em consideração sempre que se aplica um sensor em determinado processo é a caracterização do equipamento em termos de impacto que terá no processo. Em condições ideais, a inclusão de um ou mais sensores em determinada linha não deveria causar perturbações ou atrasos na resposta aquando da medição. No entanto, os sensores são componentes que fazem uso de fenómenos elétricos ou mecânicos que não são instantâneos, e como tal traduzem um atraso no sinal (θ), apresentando o seu próprio ganho processual (K) e constante de tempo (τ).

Existem descritas algumas técnicas para a determinação destes parâmetros, nomeadamente modelos empíricos desenvolvidos com base em ensaios experimentais que permitam representar o funcionamento de processos físicos e químicos. Destes destacam-se o ajuste usando regressão linear ou não linear, ajuste a funções de primeira ou segunda ordem usando ensaios de perturbação em degrau, modelos baseados em redes neuronais e modelos dinâmicos com discretização temporal [2].

Devido à natureza do sensor, do equipamento disponível e do processo em causa, um dos métodos mais simples e eficientes de aplicar é o ajuste a uma função de transferência de primeira ordem com tempo-morto (First-Order Plus Time-Delay Model) através de um ensaio de perturbação em degrau, também conhecido como curva de reação do processo. Esta técnica baseia-se na análise gráfica da curva de resposta de um processo e consequente determinação dos parâmetros do modelo FOPTD (equação 1) [2].

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{1 + \tau s} \quad (1)$$

O termo relativo ao ganho do processo pode ser determinado analiticamente dividindo o valor da resposta após atingir estado estacionário pelo valor da perturbação causada, sendo que as unidades de K dependem simultaneamente das unidades da resposta do sensor e da perturbação causada (equação 2).

$$K = \frac{\Delta y_{curva}}{\Delta y_{perturbação}} \quad (2)$$

Para se determinar os valores do tempo-morto (θ) e da constante de tempo do sensor (τ) é necessário traçar uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de resposta e uma reta de declive igual a zero que passa pela curva de resposta quando esta se encontra em estado estacionário. O tempo-morto é então calculado como sendo o valor de tempo entre o início da perturbação e o ponto da interseção entre a reta tangente e o eixo das abcissas. Por sua vez, o valor da constante de tempo pode ser determinado sabendo a diferença de tempo entre a interseção da reta tangente com o eixo das abcissas e a interseção da reta tangente com a reta horizontal. Estes procedimentos encontram-se representados graficamente na Figura 4.

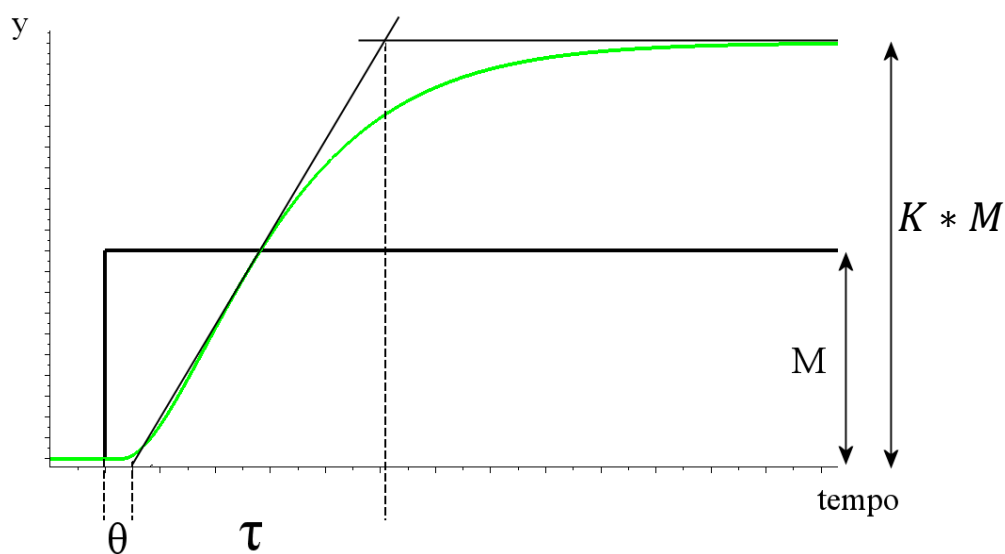


Figura 4 - Exemplo de análise de uma curva de reação e determinação dos parâmetros do modelo FOPTD.

Assim, com o intuito de caracterizar o condutímetro a ser usado, procedeu-se a uma bateria de testes em que a perturbação em degrau era conseguida através da introdução do sensor, que se encontrava previamente limpo e seco, numa solução de NaOH e consequente registo dos valores de condutividade até se atingir o estado estacionário. Foram realizados testes para 3 concentrações de NaOH diferentes, sendo que se procedeu à realização de 3 ensaios com volumetrias diferentes para cada concentração. Na Tabela 1 encontram-se apresentados os resultados obtidos para os parâmetros do sensor, estando na Tabela 2 registados os valores dos parâmetros estatísticos.

Tabela 1 - Parâmetros do modelo FOPTD para condutímetro

Ensaio	Concentração NaOH (mol/L)	Volumetria (ml)	θ (s)	τ (s)	Temperatura (°C)
1	0.0018	50	0.89	3.17	16.2
2		100	1.01	2.72	16.2
3		150	0.23	2.33	16.2
4	0.0460	50	0.94	3.49	16.6
5		100	0.58	2.47	16.6
6		150	0.75	1.28	16.4
7	0.0920	50	0.42	5.27	16.8
8		100	0.97	3.21	16.9
9		150	0.88	1.20	16.7

Tabela 2 - Valor médio e desvio-padrão para os parâmetros FOPTD determinados

	θ (s)	τ (s)	K (mS/(cm.M))
Média	0.81	2.90	187.0
Desvio-Padrão	0.19	0.42	11.3

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2, é possível verificar que o sensor apresenta um tempo-morto relativamente reduzido face aos valores típicos do tempo de amostragem do sensor (1~5s).

Posteriormente foi efetuada a simulação de uma curva de resposta do sensor face a uma perturbação em degrau unitário, a fim de avaliar a sua resposta do sensor face a um estímulo (Figura 5). De referir ainda que se determinou o tempo de resposta do sensor para os valores correspondentes a 90%, 95% e 99% do sinal, estando os resultados apresentados na Tabela 3. Todas as simulações foram realizadas usando o *software* Scilab Xcos.

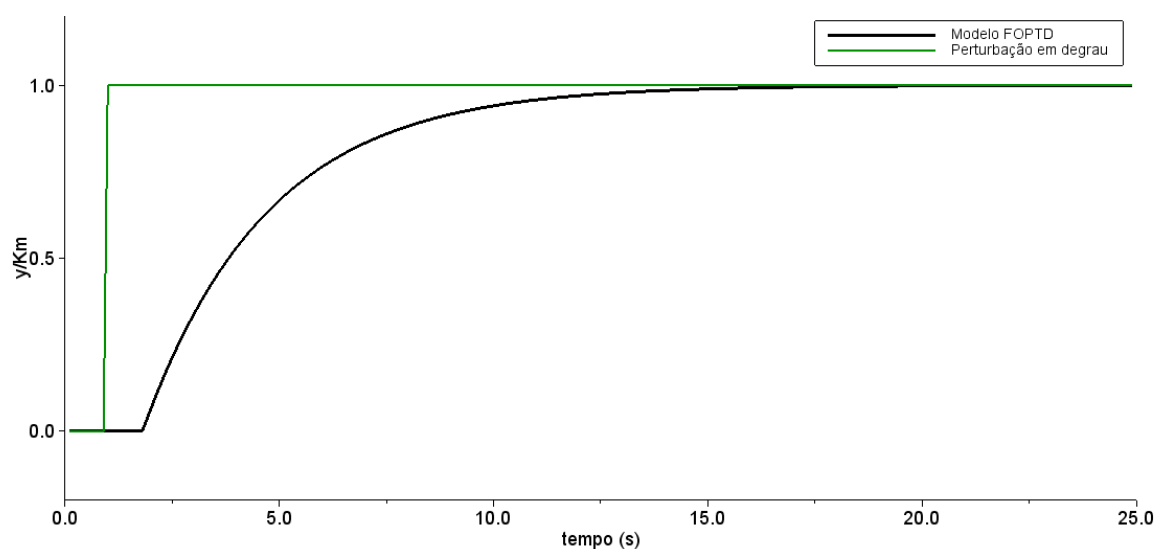


Figura 5 - Simulação da curva de resposta do sensor face a uma perturbação em degrau unitário

Tabela 3 - Tempo de resposta do sensor para várias percentagens de sinal

% de sinal	Tempo de resposta (s)
90%	7.5
95%	9.5
99%	14.2

Os resultados apresentados na Figura 5 e Tabela 3 corroboram as conclusões efetuadas anteriormente em relação ao pequeno impacto do tempo-morto do sensor nas medições, enaltecendo o impacto do tempo característico do sensor nas mesmas.

3.3 – *Software* disponível

3.3.1 – Crison® ComLabo Easy

Para que seja possível fazer a aquisição de dados do condutímetro num computador é necessário que haja *software* desenhado para tal propósito. A Crison® disponibiliza o seu *software* proprietário com cada equipamento, sendo que no caso do GLP31 é disponibilizado o Crison® ComLabo Easy adaptado especificamente para este sensor. Este programa permite acompanhar em tempo real as medições feitas pelo sensor, representando os dados na forma de um gráfico e numa tabela. Posteriormente os dados podem ser exportados em formato XPS ou para uma folha de cálculo. Neste ponto é necessário que esteja instalada uma cópia funcional do Office da Microsoft® que contenha o Microsoft® Excel para que a opção seja ativada, sendo que toda a informação transmitida entre o sensor e o computador é efetuada através de uma porta COM usando o protocolo RS232.

Um aspeto limitante na utilização deste *software* era o fato de com frequência não conseguir carregar devidamente todos os seus módulos, obrigando o utilizador a reiniciar manualmente todos os processos associados ou então reiniciar por completo todo o sistema, e em situações mais difíceis é necessário reinstalar o programa. Também se verificaram algumas falhas sistemáticas na comunicação com o sensor e na exportação de dados, que se apresentam como uma entrave na autonomia dos alunos, investigadores ou docentes caso queiram fazer ensaios com este equipamento obrigando a recorrerem ao auxílio de um técnico de laboratório.

3.3.2 – LABeq Lab Suite: modulo condutímetro (LabCE)

Com o intuito de ultrapassar os aspetos negativos apresentados anteriormente, decidiu-se criar um novo programa desenvolvido usando o *software* LabView® que apresentasse todas as funcionalidades do ComLabo Easy, mitigando todos os aspetos negativos latentes. Este módulo faz parte de um pacote de *software* desenvolvido no âmbito desta dissertação

e que é passível de ser aplicado em vários equipamentos e sensores disponíveis nos laboratórios da Universidade de Aveiro. Em termos práticos este módulo apresenta as seguintes funcionalidades:

- Permite a leitura, representação e exportação de dados de formas mas intuitiva, funcional e em configurações variáveis e orientadas à aplicação;
- Embora a linguagem de programação não seja Open-Source, o código desenvolvido é distribuído livremente permitindo que alterações e funcionalidades sejam implementadas por terceiros;
- Permite a inclusão de estratégias de tratamento de dados, simulação e implementação de modelos/correlações em tempo real sem que seja necessário recorrer ao uso de outro tipo de *software*.

Na Figura 6 é apresentado o interface Homem-Máquina do módulo LabCE evidenciando as potencialidades do uso de LabView® no desenvolvimento de *software* SCADA.

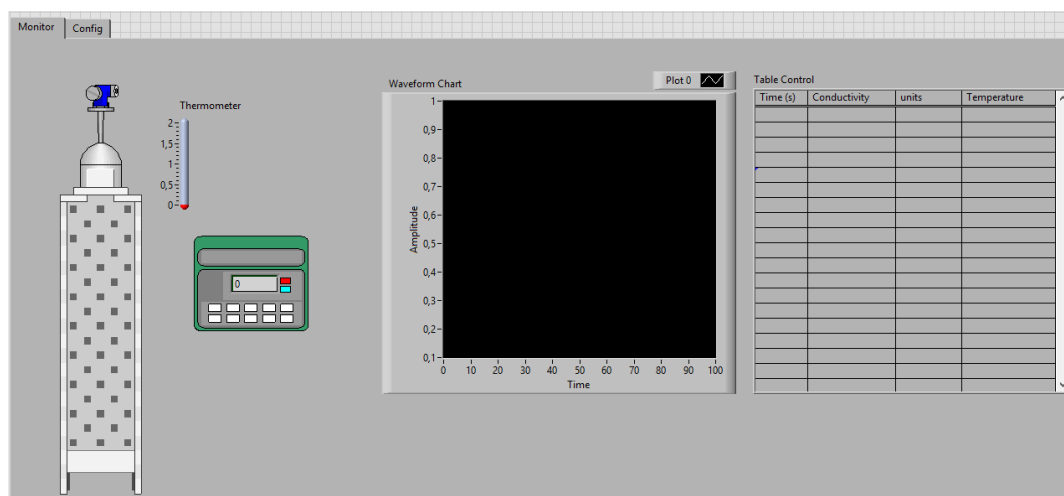


Figura 6 - Interface Homem-Máquina para o módulo LabCE

3.4 – Caso de estudo: Determinação da Curva $E(t)$ de reator tubular

3.4.1 – Modelação do reator

A utilização da DTR pode também bastante útil para a construção de modelos que tentam descrever o comportamento aparente de reatores reais. Estes modelos são normalmente combinações de vários reatores com comportamento ideal. Os modelos mais

comuns são normalmente descritos na forma de baterias de n-CSTR em série, baterias de PFR ou mistura dos dois, reatores com volume morto e/ou *bypass* e reatores com dispersão [9].

No caso específico do reator em estudo, e tendo em consideração a geometria e funcionamento do reator e o tipo de escoamento dentro do mesmo, tem sido prática comum na disciplina de Laboratórios de Engenharia Química II realizar a previsão teórica da curva $E(t)$ através do uso de um modelo de reator tubular com escoamento laminar. No entanto, e tendo por base os resultados que os alunos foram obtendo durante várias atividades experimentais recentes, verificou-se que este modelo não é capaz de representar de forma satisfatória a curva $E(t)$. Desta forma, decidiu-se estudar a aplicabilidade de um modelo de reator mais complexo, nomeadamente um modelo de série de reatores com escoamento ideal.

- **Modelo de reator tubular com escoamento laminar**

Ao ter um escoamento no regime laminar, o perfil de velocidades do fluido apresenta um formato parabólico, com o fluido na zona central do reator a apresentar a maior velocidade de escoamento e consecutivamente o menor tempo de passagem no reator [21]. A curva $E(t)$ pode então ser dada pela equação 3 [21] [22].

$$E(t) = \left(\frac{\tau^2}{2t^3} \right) * S \left(t - \frac{\tau}{2} \right) , \quad S = \begin{cases} 0 & \text{se } t < \frac{\tau}{2} \\ 1 & \text{se } t \geq \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (3)$$

- **Modelo de série de reatores**

Como já foi referido, é possível tentar modelar um reator real através de séries de reatores ideais. Considerando o resultado obtido em ensaios laboratoriais (Figura 7), propôs-se um modelo de uma série de um PFR seguido de um CSTR e finalmente outro CSTR que possivelmente apresenta zonas estagnadas e recirculação interna.

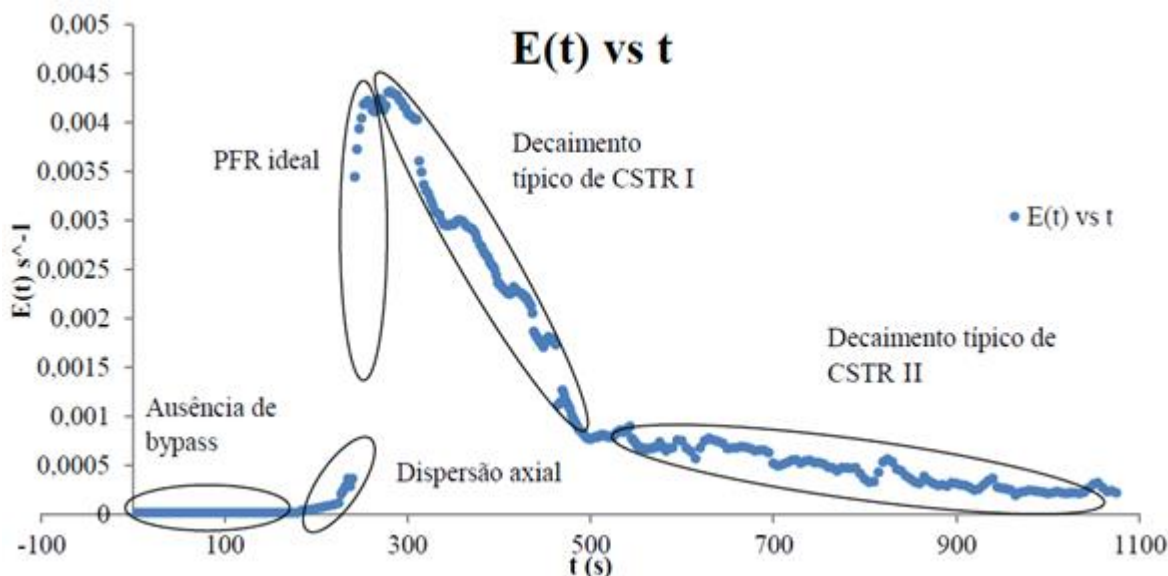


Figura 7 - Comparação do comportamento da curva $E(t)$ para um caudal de 2,55 ml/s com comportamento de reatores ideais.

Assim, e tendo por base o balanço de massa a um *tracer* num ensaio de introdução em impulso único, a curva $E(t)$ deste modelo seria então traduzida pela equação 4.

$$E(t) = S(t - \tau_p) \left(\frac{e^{-\frac{t-\tau_p}{\tau_{c2}}} - e^{-\frac{t-\tau_p}{\tau_{c1}}}}{\tau_{c1}\tau_{c2} * \left(\frac{1}{\tau_{c1}} - \frac{1}{\tau_{c2}} \right)} \right), S = \begin{cases} 0 & \text{se } t \leq \tau_p \\ 1 & \text{se } t > \tau_p \end{cases} \quad (4)$$

Há que referir que este modelo é multi-paramétrico, sendo necessário fazer várias simulações para otimizar os valores de τ_{c1} e τ_{c2} de forma a que a curva obtida consiga reproduzir os resultados experimentais da forma mais aproximada possível.

A dedução dos modelos descritos pelas equações 3 e 4 encontram-se no anexo A.1 e A.2 respetivamente.

3.4.2 – Resultados experimentais

Com o intuito de testar os modelos apresentados para os equipamentos utilizados (reator e condutímetro) e inseridos no contexto de melhoria contínua da atividade laboratorial, foram realizados ensaios de determinação da curva de DTR para o reator tubular. Nestes testes foram realizados ensaios do tipo estímulo-resposta através da introdução, em impulso único, de 2 ml de uma solução de NaOH e com um caudal de alimentação de água

destilada que garantisse que o tempo de passagem no reator fosse de aproximadamente 300 segundos. Na Tabela 4 encontram-se apresentadas as condições experimentais em cada um dos ensaios experimentais.

Tabela 4 - Condições operatórias nos testes de determinação da curva DTR

Ensaio	$V_{tracer} \pm 0.05$ (ml)	$[NaOH]_{tracer}$ (M)	$Q_v \pm 0.037$ (ml/s)	$\tau \pm 45$ (s)	$T \pm 0.05$ (°C)	Nº de Reynolds
1	2.0	1.012	2.55	318	20.0	99.3
2	2.0	1.010	2.59	311	18.1	100.8

Os resultados para as curvas $E(t)$ determinadas com os dados experimentais de cada ensaio encontram-se apresentados na Figura 8.

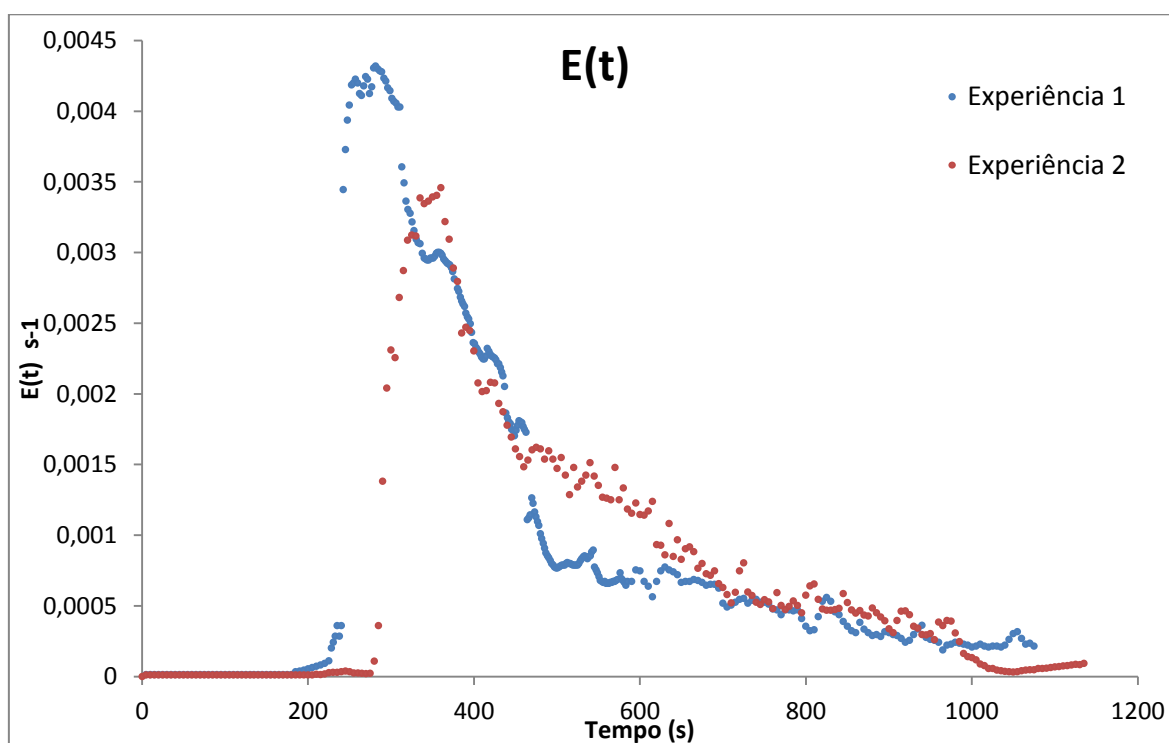


Figura 8 - Curvas $E(t)$ obtidas em cada ensaio experimental

Após a determinação das curvas $E(t)$, foi possível determinar o tempo médio de residência (\bar{t}) e o valor da variância (σ^2) para cada ensaio tal como se pode verificar na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros das curvas $E(t)$ determinadas

Ensaio	$\bar{t} \pm 15.8 \text{ (s)}$	$\sigma^2 \text{ (s}^2\text{)}$
1	444.6 ± 15.8	15129.2
2	507.0 ± 15.8	16321.6

Tendo por base os resultados obtidos, é possível modelar os reatores usando os modelos apresentados anteriormente. É de salientar que foi também efetuada a simulação dos modelos na condição de incluir o modelo FOPTD. Na Figura 9 encontra-se representado um diagrama de blocos que ilustra o procedimento de cálculo para o modelo de série de reatores, estando representado nas figuras 10 e 11 os resultados de cada modelo para cada ensaio experimental. Na Tabela 6 encontram-se os parâmetros usados na computação dos modelos. De referir que estas simulações foram realizadas recorrendo ao módulo Xcos do SciLab, encontrando-se a representação do diagrama de blocos das mesmas no anexo C.1.

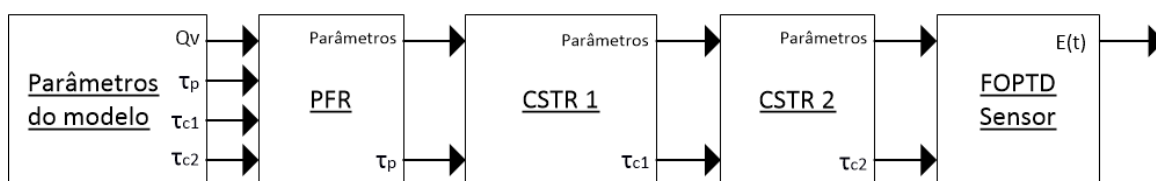


Figura 9 - Diagrama de cálculo para modelo de série de reatores

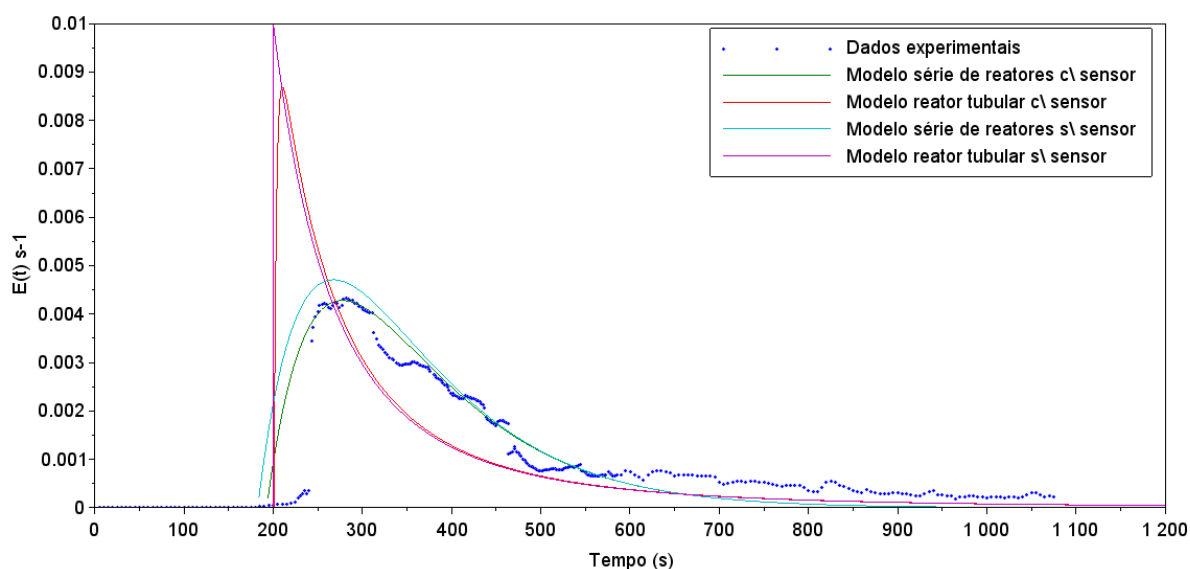


Figura 10 - Comparação entre os dados experimentais do primeiro ensaio e os vários modelos de reatores com e sem influência do sensor

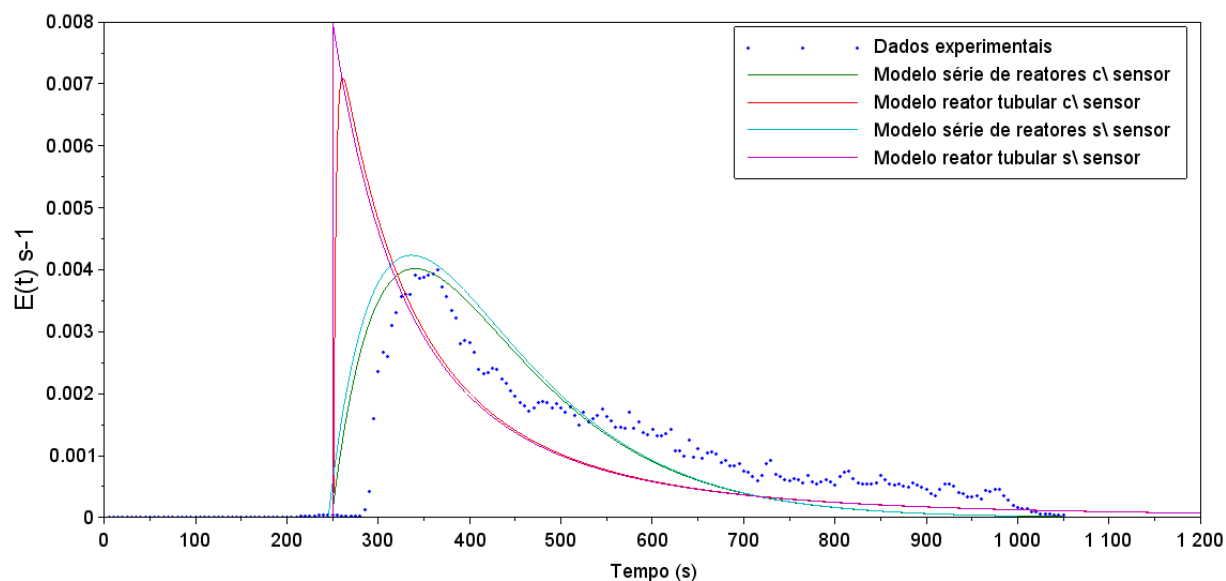


Figura 11 - Comparação entre os dados experimentais do segundo ensaio e os vários modelos de reatores com e sem influência do sensor

Tabela 6 – Parâmetros aplicados na simulação do modelo de série de reatores

Ensaio	Q_v (ml/s)	V_P (cm ³)	V_{C_1} (cm ³)	V_{C_2} (cm ³)	τ_P (s)	τ_{C_1} (s)	τ_{C_2} (s)
1	2.55	494	180	130	193.7	70.6	51.0
2	2.59	474	150	180	183.0	58.8	69.5

Tendo por base a análise das figuras pode-se verificar que o modelo de série de reatores consegue representar de forma mais satisfatória a curva $E(t)$ em ambos os ensaios comparativamente com o modelo de reator tubular, mesmo estando garantidos os pressupostos deste último (escoamento laminar). No entanto verifica-se que ambos os modelos não são capazes de fazer um bom ajuste à parte final da curva $E(t)$ já que decaem para zero mais rapidamente que os dados experimentais. A inclusão de um termo de volume estagnado no 2º reator CSTR do modelo de série de reatores poderá mitigar este efeito. Nos resultados da simulação é também visível a influência do sensor que, embora não sendo de grande magnitude, ajuda a melhorar os resultados dos modelos face aos dados experimentais. Desta forma a inclusão do modelo do sensor na modelação deste processo é um ponto a considerar uma vez que permite corrigir alguns desvios que se possam obter.

3.5– Conclusão

A inclusão de um condutímetro com capacidade de registar e transmitir as medições efetuadas permitiu melhorar o funcionamento da atividade laboratorial de determinação de curvas DTR, desviando a atenção dos alunos da aquisição de dados para o fenómeno físico e químico, tornando mais prático o registo e tratamento de dados. Foram também testados novos modelos de previsão da curva $E(t)$ e os resultados obtidos demonstraram uma melhoria significativa das previsões face ao modelo anteriormente utilizado nas aulas laboratoriais, tendo também sido possível avaliar qualitativamente a influência do sensor nos resultados obtidos. Neste ponto foi possível concluir que a inclusão do modelo do sensor na modelação do reator permite obter resultados mais concordantes com os dados experimentais, comparativamente com os modelos semelhantes que não incluem o modelo do sensor.

Por fim, e com o intuito de explorar ainda mais as potencialidades do novo sensor, foi proposta uma nova interface Homem-Máquina que permitisse adicionar novas funcionalidades anteriormente inexistentes, melhorando as atualmente disponíveis.

Outro aspeto que convém frisar são as vantagens associadas ao uso do condutímetro GLP31 e a automação do registo de dados no decorrer desta atividade experimental. Tendo realizado estes ensaios na situação em que se usava o condutímetro portátil e na situação em que era usado o novo condutímetro, é possível afirmar que o uso deste último permitiu uma execução da atividade experimental de forma mais cuidada, precisa, organizada e com menos fontes de erro. Mais, a não necessidade de recolher dados manualmente permite ao utilizador focar a sua atenção nos fenómenos físicos e químicos que antes passavam despercebidos. Considerando que a substituição do sensor foi efetuada antes do início do semestre, os alunos de Laboratórios de Engenharia Química II puderam realizar a atividade experimental nas novas condições, sendo que o desenvolvimento e implementação dos modelos propostos foram também suportados por dados recolhidos ao longo do semestre.

4 – Unidade laboratorial de pasteurização Armfield® PCT23™

O equipamento Armfield® PCT23™ é uma unidade processual perfeitamente funcional de um processo industrial de pasteurização de elevada temperatura (HTST) que pode ser usada para demonstrar uma série de metodologias e estratégias de controlo de processos, variando entre um simples controlo manual até ao controlo em cascata e implementação de sistemas de supervisão e aquisição de dados via um computador remoto ou sistema embutido (*embedded system*). Presentemente, esta unidade encontra-se apenas a ser utilizada no âmbito do estudo de dinâmica de sistemas de dois tanques, embora apresente a possibilidade de ser aplicada noutras atividades experimentais

4.1 – Equipamento experimental

A nível global, este equipamento é constituído por dois tanques (A e B) interligados por via de uma válvula manual (V2) e que possuem sistemas independentes de alimentação (SOL4 e SOL5), um permutador de placas compacto, uma unidade de aquecimento de água, duas bombas peristálticas (N1 e N2), cinco termopares estrategicamente distribuídos pelo equipamento (T1 a T5), um medidor de caudal para bomba peristáltica N1 (F1), um transdutor de pressão para determinação do nível do tanque A (L1), sensores de nível alto e baixo do tipo boia flutuante nos tanques B e na unidade de aquecimento (HL, LL e HLL), 3 válvulas solenoides (SOL1 a SOL3) e uma consola de controlo tal como se pode observar na Figura 12.

Acoplado com o PCT23™ encontram-se disponíveis mais dois equipamentos que permitem expandir a versatilidade do equipamento: um controlador PID industrial, o Armfield® PCT20H com o controlador Honeywell® UDC3300, e uma unidade PLC industrial, o Armfield® PCT19BR com o PLC Allen Bradley® SLC500, como pode ser observado na Figura 13.

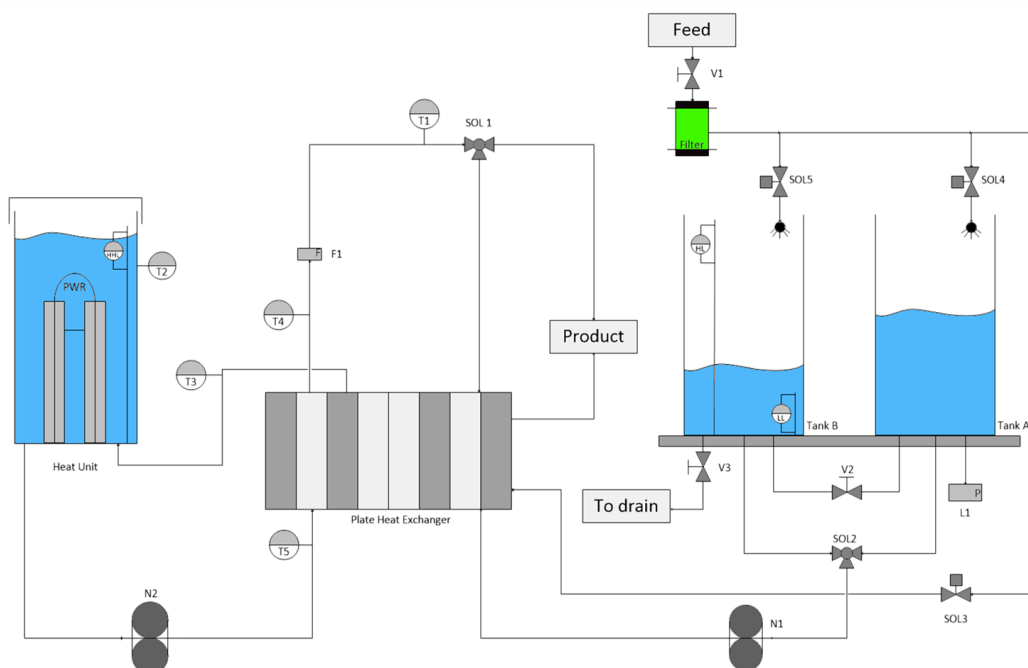


Figura 12 - Diagrama de equipamento e instrumentação da unidade PCT23

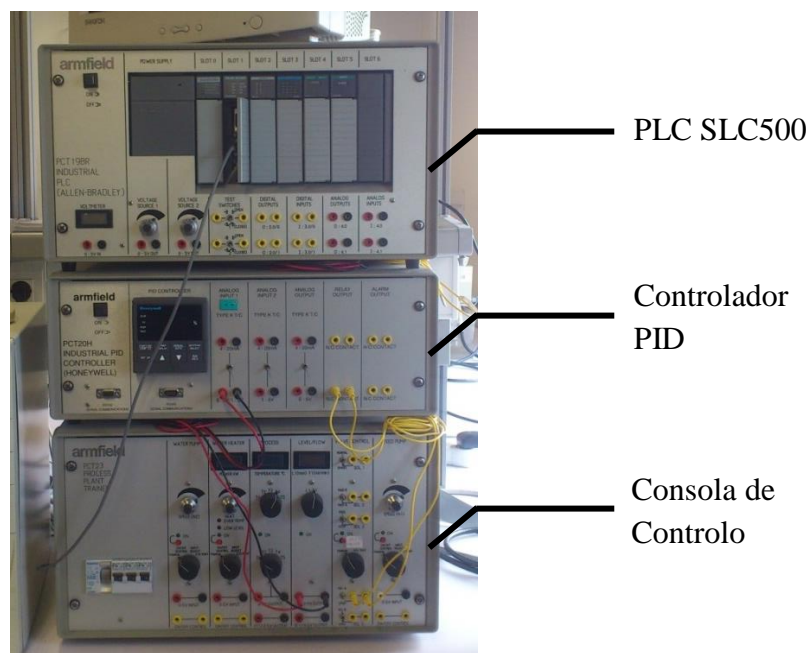


Figura 13 – Equipamento opcional da unidade PCT23. Do topo para a base: SLC500, PCT20H e consola de controlo

4.1.1 – Consola de Controlo

A consola de controlo da unidade PCT23 fornece uma interface elétrica e de condicionamento de sinal dos equipamentos da unidade, apresentando a capacidade de

controlar manualmente as válvulas, bombas e resistência elétrica da unidade, ou de forma automática através de um controlador externo como a unidade PCT19BR, PCT20H entre outros, havendo a possibilidade de escolher de forma individualizada o tipo de controlo aplicado à unidade de aquecimento, controlo de válvulas e controlo de bombas.

A comunicação entre a consola de controlo e a unidade de pasteurização é realizada através de 2 cabos distintos: o cabo DC37 que transmite os sinais analógicos dos sensores de temperatura, nível e caudal, e o cabo Burndy de 24 pinos que transmite os sinais de controlo para as válvulas da unidade.

O cabo DC37 estabelece a ligação entre a consola de controlo do PCT23 e a unidade de pasteurização, e é denominado pelo fabricante como *Process Connector* [23] [24] [25]. Na Figura 14 encontram-se representadas as correspondências entre os pinos do conector e o sinal dos sensores transmitido, estando na Tabela B1 uma breve descrição dos mesmos.

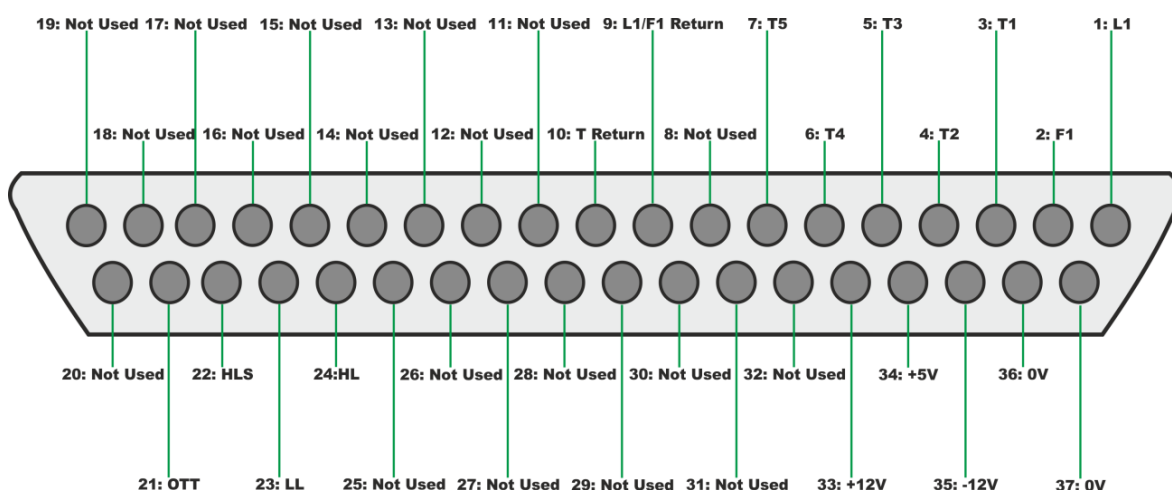


Figura 14 - Sinais elétricos no cabo DC37

Por sua vez, a ligação Burndy de 24 pinos estabelece a comunicação dos sinais correspondentes ao controlo das válvulas do sistema e das bombas peristálticas e a consola PCT23, como se encontra descrito na Figura 15 e na Tabela B2 [23]. Uma característica interessante nesta ligação é o fato de existir uma unidade de falhas nesta ligação.

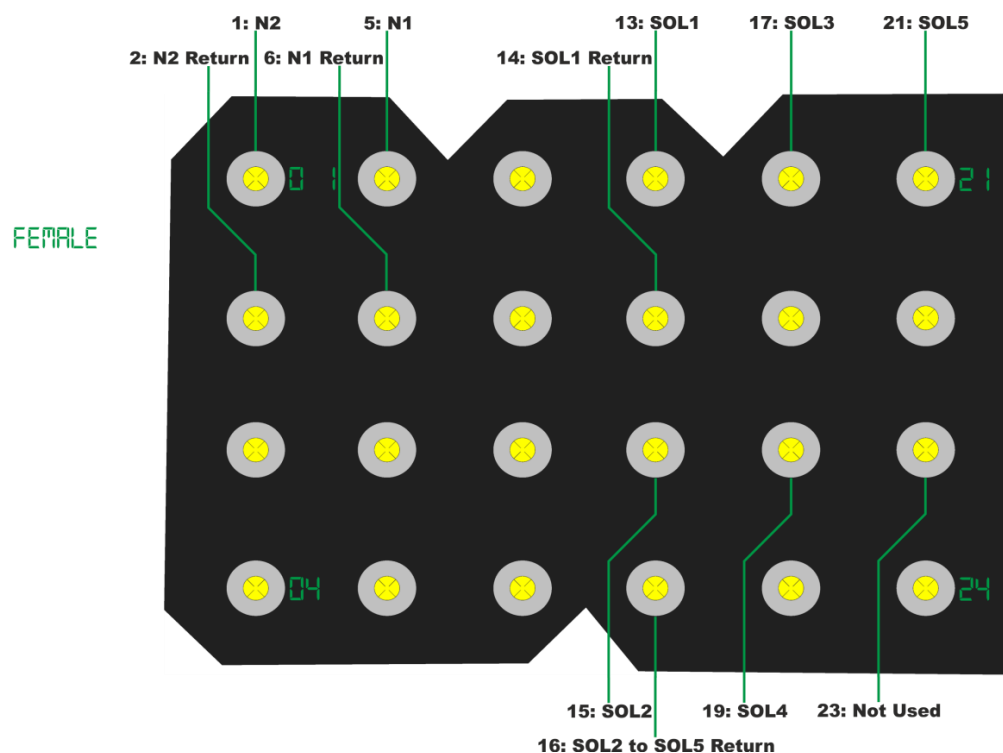


Figura 15 - Cabo Burndy de 24 pinos

Esta unidade de falhas descrita na Figura 16 permite estudar a resposta dos sistemas de controlo face a uma falha eléctrica de um ou mais equipamentos [26].

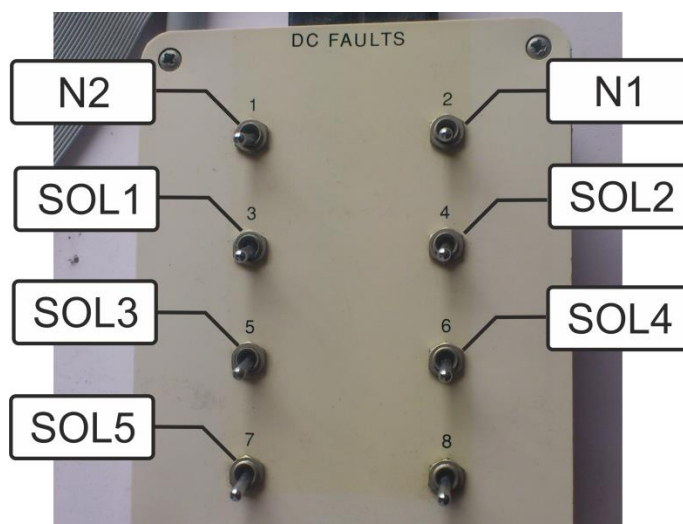


Figura 16 - Unidade de falhas da unidade PCT23

4.1.2 – Sinais elétricos no equipamento

Uma vez identificado o tipo de ligações entre a unidade de controlo e a unidade de pasteurização, impõe-se determinar que tipo de sinal corresponde a cada elemento da unidade de pasteurização. Na documentação que acompanha a unidade de pasteurização encontram-se identificados os diagramas elétricos do equipamento e as gamas de voltagens nas quais os equipamentos operam [23]. Um aspeto comum entre todos os equipamentos desta unidade é o fato de operarem nas gamas de tensão dos 0 a 24 V em corrente contínua, sendo que os sinais transmitidos pela consola de controlo se encontram na gama dos 0 a 5 V. No entanto, e na eventualidade de se querer fazer uma leitura ou manipulação direta dos sinais sensores, válvulas ou bombas do equipamento, é necessário conhecer a relação entre o sinal elétrico de um equipamento e as variáveis processuais, ou seja, conhecer a calibração usada pelo fabricante ou determinar uma nova.

Uma vez que não foi possível identificar a calibração do fabricante, procedeu-se à determinação de novas calibrações. No caso das bombas peristálticas foi efetuada a medição do sinal que alimenta as bombas em função de diferentes caudais² bem como a tensão mínima (0.49V) que a bomba precisa para vencer a resistência inicial imposta pelo equipamento em si e as tubagens. Na Figura 17 encontram-se representados os caudais em função da tensão de alimentação obtidos e o ajuste efetuado (equação 5). De referir que, por uma questão da manutenção da integridade física do equipamento, não se realizaram ensaios próximos da capacidade máxima de operação das bombas, no entanto, como a relação caudal - sinal de alimentação é linear, na eventualidade de ser necessário operar o equipamento para caudais elevados facilmente se poderá usar, extrapolando, a calibração obtida.

$$Q_v \left(\frac{ml}{min} \right) = (165.46 \pm 0.90) * U (V) + (-69.13 \pm 8.05), U \in [0.49; 13.02] \quad (5)$$

² Devido à natureza da bomba, o caudal depende da natureza e propriedades físicas da tubagem tais como diâmetro, espessura ou material.

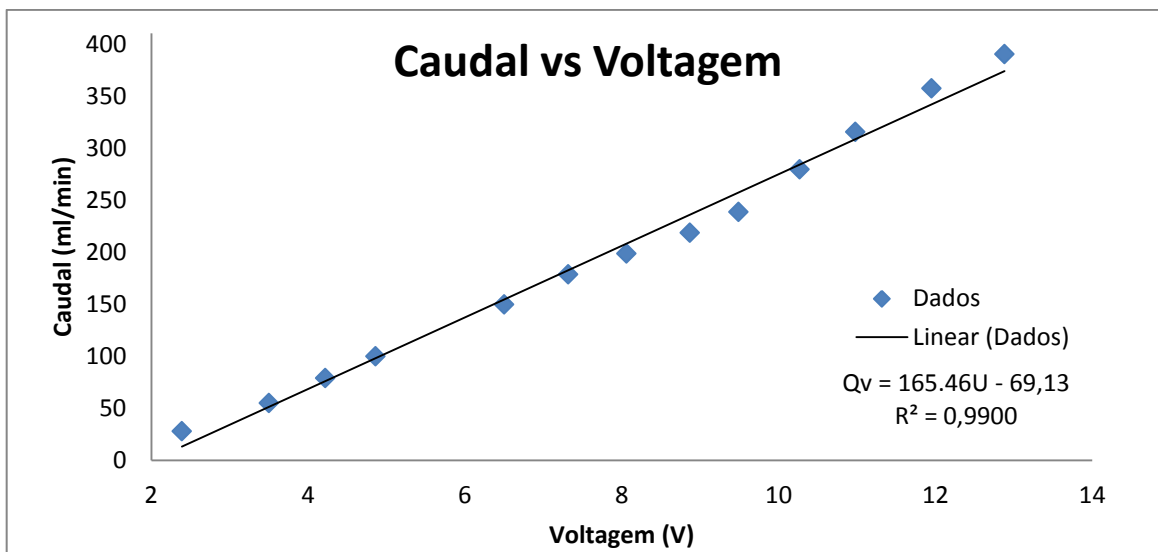


Figura 17 – Relação entre a tensão de alimentação e caudal das bombas peristálticas

O nível dos tanques é medido recorrendo a um transdutor de pressão, F1, que relaciona a pressão hidrostática com o nível de água do tanque. Não obstante, o transdutor de pressão envia um sinal elétrico entre os 0 e os 5 V consoante a altura da coluna de água. Deste modo e de forma semelhante ao efetuado para o caudal das bombas, efetuaram-se ensaios com diferentes alturas de coluna de água medindo o respetivo sinal do transdutor de pressão, como representado na Figura 18, obtendo-se a reta de calibração descrita na equação 6.

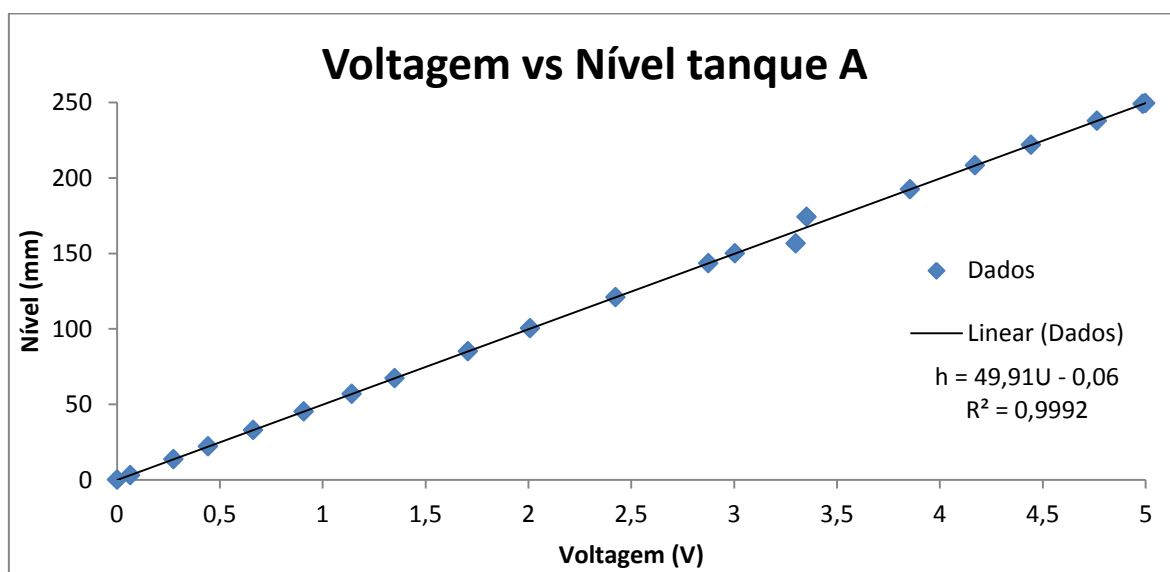


Figura 18 - Relação entre tensão do transdutor de pressão L1 e o nível no tanque A

$$h \text{ (mm)} = (49.91 \pm 0.32) * U(V) + (-0.06 \pm 0.93) \quad (6)$$

Por fim foi ainda aplicada a mesma metodologia aos termopares instalados na unidade. A calibração foi efetuada usando os 5 termopares de tipo K de modo a mitigar possíveis erros de calibração. No entanto esta metodologia poderia acarretar a necessidade de retas de calibração para cada sensor. Contudo, tal não foi necessário já que a respostas dos termopares às condições da calibração foram semelhantes. É de salientar ainda que no sistema se encontram embutidos transmissores de temperatura cujo sinal de saída é proporcional à gama de temperaturas configuradas (gama não documentada no manual do equipamento) e que variam entre 0 a 5 V. Na Figura 19 encontram-se representados os dados experimentais recolhidos e o ajuste de dados efetuado (equação 7).

$$T \text{ (}^{\circ}\text{C)} = (30.14 \pm 0.24) * U(V) + (-0.47 \pm 0.30) \quad (7)$$

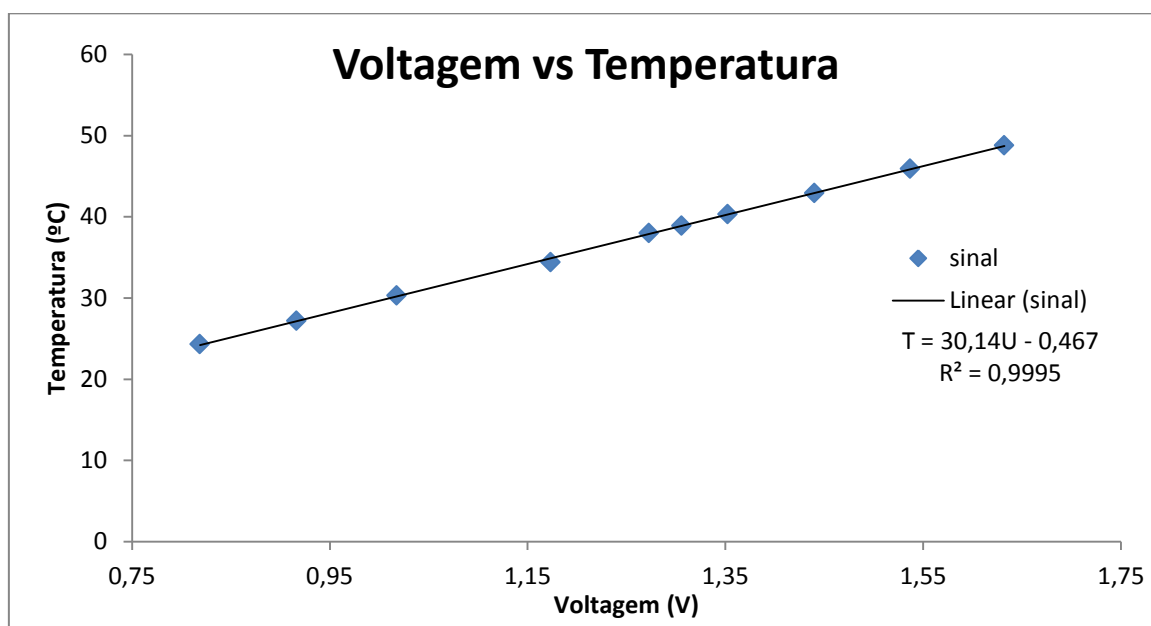


Figura 19 – Relação entre o sinal dos termopares e a temperatura

4.2 – Aplicação de PLC na unidade PCT23

Dada a instrumentação disponível na unidade laboratorial de pasteurização, existe a possibilidade de aplicar um controlador lógico programável e um sistema SCADA à unidade de pasteurização, aumentando assim a versatilidade do sistema. Atualmente

encontra-se instalado um PLC, Allen-Bradley® SLC500, com o seu respetivo *software* proprietário.

4.2.1 – SLC500

O PLC Allen-Bradley® SLC500 é um controlador lógico programável pertencente a uma vasta família de PLCs modulares que apresentam uma elevada capacidade de processamento de sinais de entrada e saída e que se encontram disponíveis numa larga variedade de configurações de processador, fontes de alimentação ou terminais I/O. Embora seja um dos primeiros controladores lógicos programáveis de dimensões reduzidas, continua a ser uma referência no panorama do controlo industrial distribuído ou dos autómatos de médio porte.

No caso específico do PLC presente nos laboratórios, o SLC500 apresenta o módulo CPU SLC 5/02, a nível de comunicações está equipado com o módulo RS232 1747-KE que apresenta 3 portas de comunicação [27]. Em termos de terminais I/O estão disponíveis 4 terminais distintos: o terminal de Relay 1746-OW8 com 8 canais, o terminal de input digital 1746-IG16 com 16 canais, o terminal de input/output analógico 1746-NIO4V com 2 canais de entrada e 2 de saída e finalmente o terminal de input analógico 1746-NI4 com 4 canais [28]. A comunicação entre o PLC e a consola de controlo é efetuada via um cabo IDC50 que contém todos os sinais do processo.

- **Identificação de sinais no conector IDC50**

Um dos procedimentos iniciais para que seja possível descrever a forma de comunicação entre o PLC e a consola de controlo, é o mapeamento dos sinais no conector IDC50 que faz a comunicação entre estes dois equipamentos. Este procedimento foi levado a cabo tendo por base a informação disponível nos manuais do equipamento [24] e o esquema elétrico deste tipo de conexão [23] [29]. Na Figura 20 e nas Tabela B3 a B5 encontram-se representadas as correspondências entre os pinos do conector e os sinais transmitidos e recebidos pelo PLC.

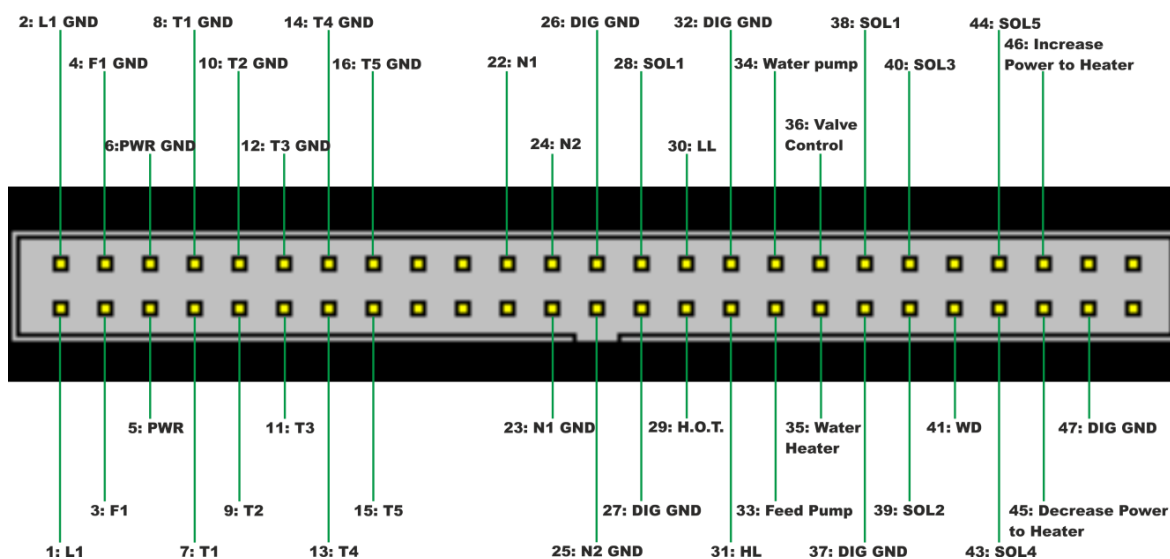


Figura 20 - Sinais elétricos no conector IDC50

Uma vez identificados os sinais usados pelos diferentes módulos que constituem a unidade de pasteurização, impõe-se avaliar e definir qual a melhor abordagem a adotar no intuito de melhorar e modernizar a unidade em estudo. O módulo que se identifica como o mais vantajoso em modernizar é o PLC SLC500 já que este, devido à configuração escolhida aquando da sua aquisição, apresenta desvantagens que afetam inclusive o seu funcionamento diário. Um dos pontos que mais pesa negativamente é a sua dependência de uma placa de aquisição de sinais, de uma chave de proteção física, com interface ISA, e de um sistema operativo (MS DOS) bastante desatualizado e que começa já a apresentar algumas incompatibilidades com hardware mais recente. Por outro lado, a imposição da programação se ter que efetuar em linguagem Ladder, numa interface rudimentar e que não é lecionada no curso, torna a sua modificação no mínimo difícil. Mais, a atual configuração permite apenas que ou o PLC SLC500 opere de forma autónoma ou que o controlo seja realizado recorrendo exclusivamente ao PC, sendo que apenas na última opção seja possível monitorizar graficamente os sinais e as ações de controlo.

O módulo PCT23, por sua vez, apresenta algumas funcionalidades interessantes e que se posicionam como uma mais-valia na modernização da unidade, nomeadamente a possibilidade de operar/monitorizar a unidade de pasteurização de forma manual e, talvez a mais importante, já ter implementado sistemas de segurança robustos.

No que respeita aos sistemas de segurança implementados no módulo PCT23 destaca-se o Watchdog.

O Watchdog, ou mais corretamente Watchdog Timer (**WDT**), é um temporizador eletrónico que é usado como medida preventiva e de emergência caso ocorra algum tipo de anomalia [30]. Essencialmente, um Watchdog é um circuito eletrónico implementado em sistemas de difícil acesso físico ou que, devido à natureza da implementação do sistema, não seja possível garantir que haja algum tipo de supervisão humana durante largos períodos de tempo, e que é capaz de fornecer uma forma de colocar o equipamento em modo de segurança caso se verifique alguma anomalia de hardware ou *software* [31].

No caso específico do PLC SLC500, o equipamento envia periodicamente um impulso digital através do pino 41 do conector IDC50 (sinal do watchdog [23]) que é interpretado como um sinal de boa comunicação e controlo ativo entre o PLC e o PCT19BR. Na eventualidade de uma falha no programa ou uma desconexão, o impulso digital deixará de ser enviado e ao final de 10 segundos a consola de controlo irá entrar em modo de segurança. Esses circuitos apenas podem ser reativados quando o sinal do Watchdog é manual e fisicamente restabelecido (via um botão On/Off correspondentes ao Watchdog) e todos os módulos de controlo da consola sejam manualmente colocados em modo MANUAL [24].

Em relação ao impulso digital, o sinal tem de ser um sinal digital com compatibilidade TTL (*Transistor Transistor Logic*), com uma taxa de amostragem inferior a 8 segundos e com uma duração superior a 20 milissegundos. Tipicamente o impulso é realizado a cada segundo e possui uma duração de 1 segundo, enviando efetivamente 5 impulsos entre cada período que corresponderia ao *Time Out* do Watchdog [24].

Outro sistema de segurança interessante prende-se com o controlo do sistema de aquecimento da unidade. Neste, a manipulação da potência da resistência é feita através de sinais digitais que alimentam um integrador que pode ser elevado (*driven up*) ou reduzido (*driven down*) através de sinais digitais de forma a proporcionar uma potência proporcional ao estado do integrador [24]. Mais, para que o integrador mantenha o seu estado e com isso a potência de aquecimento não se altere, é necessário que haja um *loop* de controlo que

envie periodicamente impulsos para o integrador. Caso este *loop* seja quebrado, a potência decai para zero ao longo do tempo.

Em relação aos sinais, estes devem ser compatíveis com TTL (tal como o sinal do watchdog), sendo que o impulso de aumento da potência é enviado através do pino 46, e o impulso de diminuição é enviado pelo pino 45 do conector IDC50 [23].

4.2.2 – PLC Beckhoff CX9020

O PLC Beckhoff com o módulo de processador CX9020 (doravante designado apenas por CX9020) disponível nos laboratórios de Engenharia Química é um controlador lógico programável compacto que apresenta um processador de arquitetura ARM funcionando a uma frequência de 1GHz, 1GB de memória RAM e 128 KB de memória RAM não-volátil (NOVRAM). Comparativamente com o SLC500, este PLC apresenta uma maior capacidade de processamento de sinais graças ao seu hardware mais recente e com maior capacidade de processamento.

Ao ser um equipamento modular assente num sistema de calhas DIN (DIN Rail) é possível adicionar vários terminais EtherCAT ao CX9020 (desde I/O analógicos e digitais, Relays e terminais para termopares) tornando este equipamento bastante versátil e que pode ser aplicado em vários equipamentos e instrumentos, ao contrário do que se verifica com o SLC500 cuja aplicação se encontra atualmente limitada à unidade PCT23 (Figura 21).



Figura 21 – Beckhoff CX9020 e cartas de aquisição

4.2.3 – Aplicação do CX9020 na unidade PCT23

Um dos aspetos importantes a definir é a forma de aplicação do PLC CX9020 na unidade de pasteurização. Em termos práticos existem duas abordagens possíveis para a implementação do CX9020: uma através da leitura e manipulação direta dos sinais da unidade eliminando assim o módulo PCT23, e outra apenas através da substituição do SLC500. Na primeira alternativa os cabos DC37 e Burndy 24 pinos em vez de estarem ligados à consola de controlo estariam ligados diretamente ao CX9020 através de adaptadores, permitindo assim a manipulação direta dos sinais da unidade de pasteurização. Contudo, como descrito anteriormente, as vantagens de manter o módulo PCT23 sobrepõe-se à maior flexibilidade que se poderia ganhar em construir um sistema de controlo de raiz. Em relação à segunda alternativa, a aplicação do CX9020 seria efetuada na forma de uma substituição do SLC500, estando o PLC CX9020 ligado à consola de controlo através de cabo IDC50. Esta abordagem permite a manutenção dos restantes equipamentos (consola de controlo, controlador PID e consola de falhas) bem como as valências por eles garantidas tais como o Watchdog, os interruptores manuais ou a cablagem instalada. Por outro lado esta abordagem permite que em caso de necessidade, por exemplo acoplar o CX9020 a outro equipamento, o SLC500 possa facilmente reativado. Assim, decidiu-se optar por esta via de aplicação do CX9020 à unidade de pasteurização.

Num passo seguinte procedeu-se ao levantamento do tipo de cartas que se deverão acoplar ao módulo CX9020 de modo a poder utilizar os sinais provenientes da consola de controlo. Na Tabela 7 encontram-se representados os terminais Beckhoff adquiridos em função dos sinais no cabo IDC50, sendo que no anexo E.2 a E.4 se encontra uma descrição detalhada dos mesmos.

Tabela 7 - Sinais no cabo IDC50 e módulos EtherCAT necessários

Tipo de sinal	Quantidade de ligações	Terminal Beckhoff	Quantidade de módulos
Input Analógico	12	EL3064	3
Output Analógico	2	EL4004	1
Relay	8	EL2624	2

Com o intuito de criar uma interface física universal para o PLC CX9020, criou-se uma estrutura metálica que suporta tanto o PLC e seus módulos, mas também a fonte de alimentação (Figura 22). A alimentação dos sinais elétricos é efetuada através de dois conectores DB25 e um conector DE9, bastando apenas implementar um adaptador de conectores desenhado em função de cada caso de aplicação. Desta forma é possível simplificar a implementação noutros equipamentos. No caso específico da implementação na unidade PCT23 foi desenvolvido um adaptador para o conector IDC50 e os conectores do PLC tal como se pode ver na Figura 23. No anexo E.7 é apresentado o esquema de ligações deste adaptador.

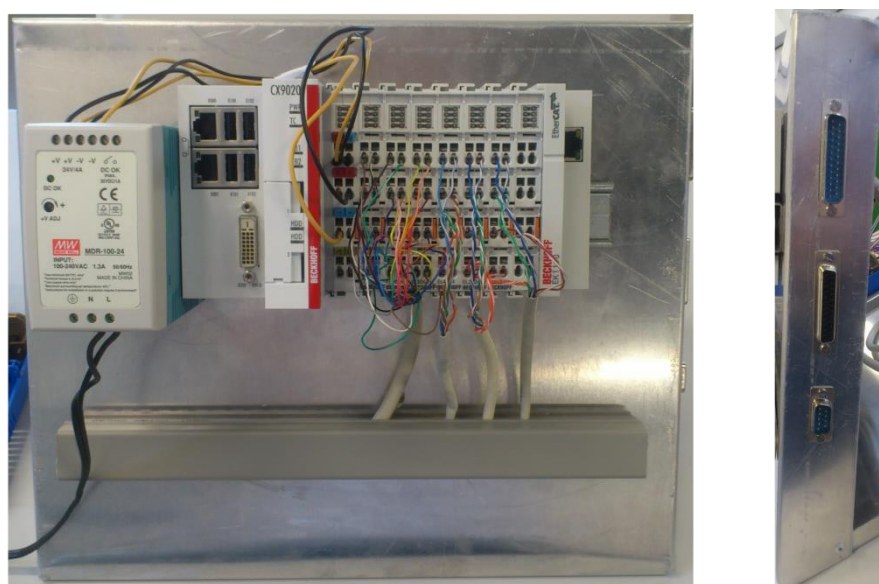


Figura 22 – PLC Beckhoff CX9020 e módulos disponíveis nos laboratórios (vista frontal e lateral)



Figura 23 – Adaptador IDC50 para CX9020

Para que o equipamento esteja pronto para ser aplicado na unidade de pasteurização é ainda necessário proceder à sua configuração com o *software* de comunicação (TwinCAT II) e programação do controlador. Neste último ponto existem algumas alternativas: criar

um programa que estará armazenado na memória do CX9020 e será computado pelo mesmo, ou usar uma linguagem de alto nível capaz de comunicar com o PLC para criar *software* SCADA. Neste ponto optou-se por usar uma estratégia que combina as duas soluções. Na memória do PLC encontra-se um programa desenvolvido com auxílio do TwinCAT II, cujo objetivo é monitorizar os sinais do sistema e detetar se algum parâmetro se encontra fora dos limites de segurança, tomando uma ação de controlo caso isso se verifique e que não pode ser contrariada por uma ação forçada do utilizador. O algoritmo deste programa encontra-se descrito no anexo C.3. O *software* SCADA foi desenvolvido usando as potencialidades do LabView® e integra os vários algoritmos de monitorização e controlo, bem como o sinal de Watchdog, podendo também incluir novas funcionalidades como a representação de modelos matemáticos para o processo ou tratamento automático dos dados registados.

4.3 – Caso de estudo: Controlo de nível

4.3.1 – Modelo de descarga de tanque e simulação em Xcos™

Um dos subprocessos mais importantes nos processos industriais em geral, e no processo de pasteurização em particular, é o controlo de nível de fluido em tanques. É possível fazer esse controlo através de um controlador on-off com limites superiores e inferiores de controlo, no entanto se for necessário prever o comportamento da descarga dos tanques é necessário usar ou desenvolver modelos capazes de descrever o fenómeno.

Tendo por base os fundamentos da hidrostática e equações de escoamento de fluidos, foi possível desenvolver um modelo capaz de traduzir a variação do nível de fluido no tanque A perante várias perturbações como abertura de válvulas de alimentação ou purga, ou funcionamento de bombas peristálticas, sendo que estas perturbações podem ocorrer isoladamente ou em simultâneo. Matematicamente, a variação do nível do tanque A em função do tempo para um processo de descarga com a bomba N1 pode ser dada pela equação 8. De referir que a dedução deste modelo se encontra apresentada no anexo A.3.

$$h_A(t) = \frac{1}{2} \left(h_{A_0} + h_{B_0} + \varphi + \left(\sqrt{h_{A_0} - h_{B_0} + \varphi} * \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \right)^2 \right), \varphi = \frac{(Q_v^{SOL4} + Q_v^{SOL5} - Q_{V_{N1}}) \cdot t_f}{A} \quad (8)$$

4.3.2 – LABeq Lab Suite : Controlo de Nível e Dinâmica de Sistemas (LabDS)

Há semelhança do que foi realizado para o condutímetro implementado no equipamento experimental da atividade de determinação da curva DTR, desenvolveu-se *software* usando LabView® que permitisse não só a leitura dos sinais da unidade como a implementação de um sistema de controlo automático ou a atuação manualmente das válvulas SOL 4 e SOL5 e o caudal da bomba peristáltica N1. De notar que a ação manual pode ser realizada enquanto o *software* opera em modo automático.

Em termos funcionais, este módulo foi programado de modo a reproduzir de forma análoga ao *software* de controlo de nível dos tanques para o SLC500, todas as ações necessárias ao estudo da dinâmica de escoamento entre os dois tanques da unidade PCT23, nomeadamente a monitorização e registo das variáveis processuais (nível dos tanques e caudal da bomba N1), regulação do caudal da bomba N1 e controlo manual e automático das válvulas de alimentação SOL4 e SOL5. Como forma de complementar o programa podem também ser adicionadas novas funcionalidades, nomeadamente alteração dos parâmetros do controlador on/off, implementação do modelo de descarga de tanques anteriormente descrito e um modo de depuração que permite o funcionamento do módulo mesmo quando se encontra desconectado da unidade de pasteurização, permitindo que seja usado como material de apoio a aulas de instrumentação e controlo ou na preparação das atividades experimentais. Na Figura 24 encontra-se apresentada a interface gráfica do módulo LabDS.

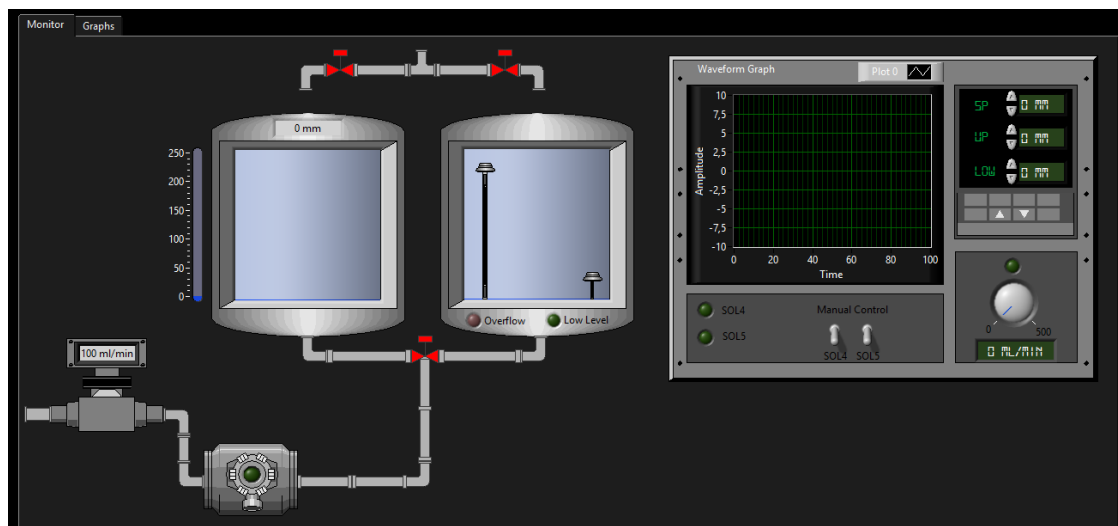


Figura 24 - Interface gráfica do módulo LabDS. À esquerda é apresentado um diagrama do processo e à direita encontra-se o painel de controlo

4.3.3 – Resultados experimentais

Com o intuito de testar o módulo LabDS e os modelos para a descarga dos tanques, foram realizados vários ensaios de descarga do tanque A para o tanque B para cargas iniciais diferentes e com ou sem a influência das válvulas SOL4 e SOL5, estando os resultados apresentados nas figuras 25 a 27. Seguidamente compararam-se os resultados experimentais com os resultados das simulações para os modelos propostos.

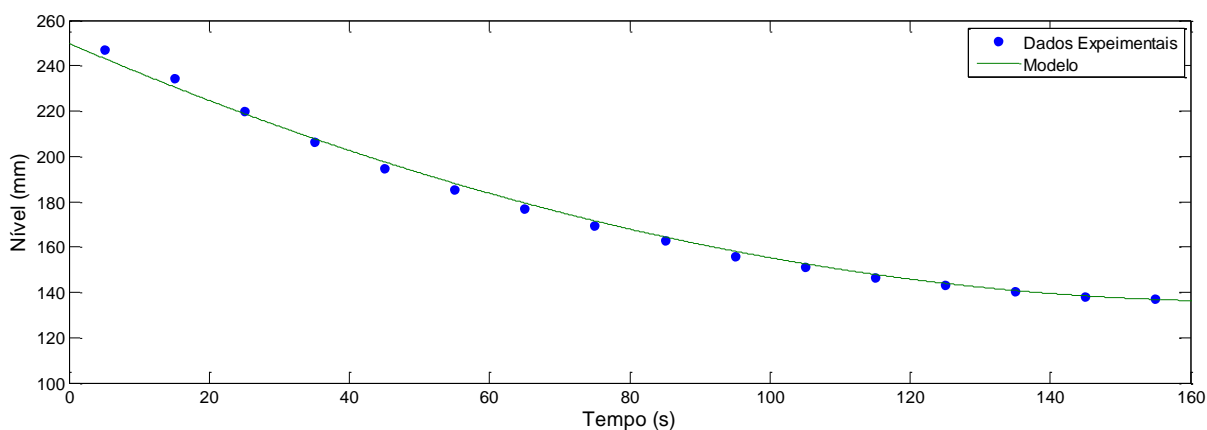


Figura 25 - Processo de descarga do tanque A para o tanque B com SOL4 e SOL5 desligadas

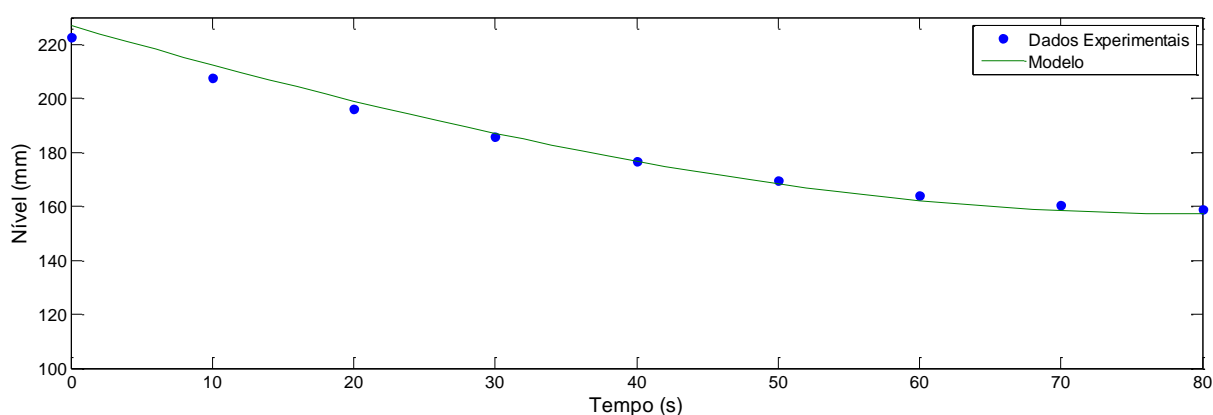


Figura 26 - Processo de descarga do tanque A para B com SOL5 ligado (ensaio nº1)

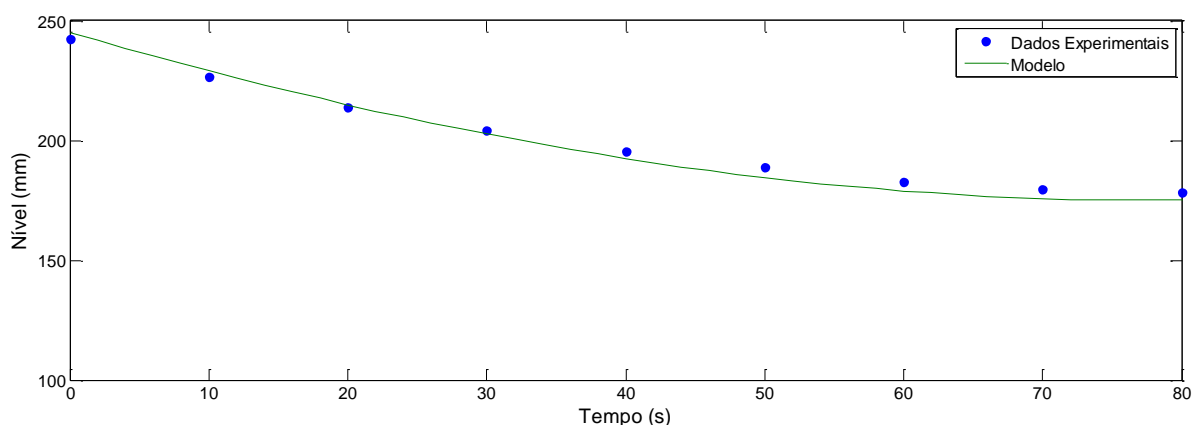


Figura 27 - Processo de descarga do tanque A para B com SOL5 ligado (ensaio nº2)

Analisando os resultados obtidos é possível verificar que o modelo proposto permite descrever de forma bastante satisfatória o processo de descarga para várias condições de operação, tendo-se também concluído que o valor inicial de fluido nos tanques não influencia o ajuste de dados por parte do modelo.

De seguida foi efetuado um ensaio de controlo de nível do tanque A durante um processo de carga/descarga com influência da bomba N1 e abertura da válvula manual V2 à semelhança da atividade experimental da disciplina de Laboratórios de Engenharia Química II, desta vez usando o novo módulo LabDS. Para complementar a análise das potencialidades dos modelos de descarga foi efetuada a simulação do processo de controlo de nível com descarga para o tanque B, tendo a simulação sido computada utilizando o *software* Scilab Xcos. Na Figura 28 encontram-se representados os resultados experimentais para uma atividade de controlo de nível com a válvula SOL5 desligada, com

um caudal da bomba N1 de 368.6 ml/min, o set-point do controlador definido nos 150 mm de nível de água, com limites de controlo entre os 144.4 mm e os 156.6 mm.

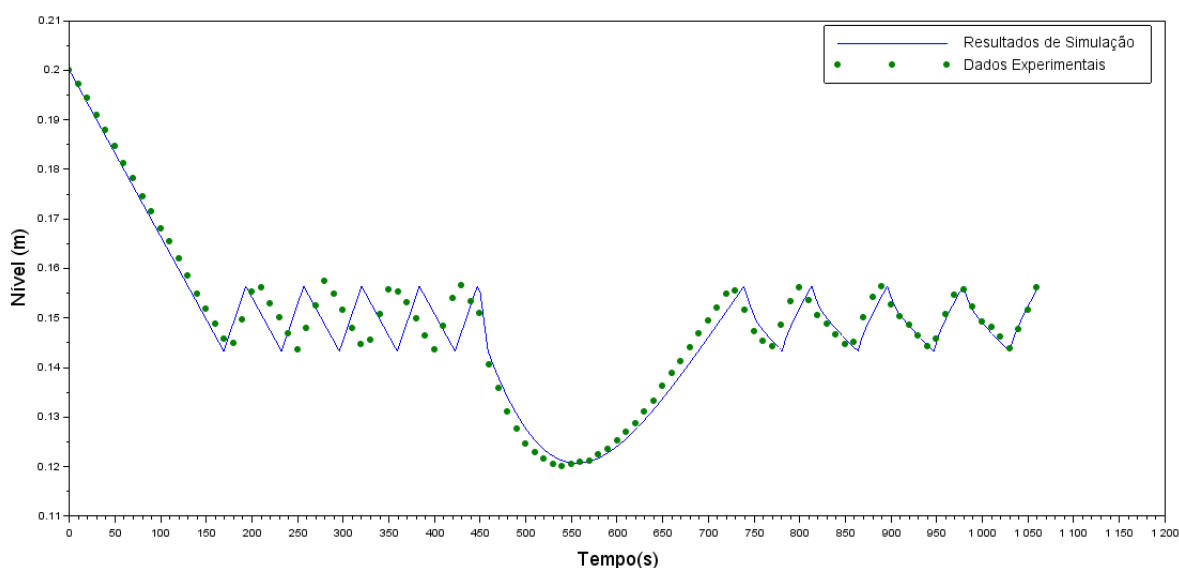


Figura 28 - Resultados experimentais para controlo de nível de tanque A e resultados de simulação

Como é possível observar pela Figura 28, o modelo usado para simular o processo consegue acompanhar com algum grau de exatidão as variações de nível no tanque, apresentando apenas alguns desvios entre os 200 segundos e os 400 segundos, voltando novamente a ajustar decentemente os resultados experimentais até ao final do conjunto de dados. Estes desvios podem ser explicados pelo facto de nos instantes iniciais da atividade terem sido registadas variações significativas no caudal da bomba N1 (entre os 315.8 ml/min e os 377.1 ml/min), tendo o valor do caudal estabilizado em torno do valor estabelecido aproximadamente aos 400 segundos. Posto isto, verifica-se que a aplicação deste modelo de ajuste na previsão de variação de nível no tanque A é possível, obtendo-se resultados satisfatórios.

4.4 – Caso de estudo: unidade de pasteurização

Outro caso de estudo possível de ser realizado com recurso ao CX9020 é o funcionamento integral da unidade PCT23 num processo de pasteurização, fazendo uso de todos os equipamentos instalados na unidade. Para garantir o bom funcionamento do processo é necessário garantir que se encontram aplicadas algumas estratégias de controlo, nomeadamente:

- Controlo do nível dos tanques apresentando no caso de estudo anterior;
- Controlo de sobreaquecimento do fluido quente na unidade de aquecimento;
- Controlo da temperatura das correntes do permutador de placas;
- Controlo de qualidade do produto final.

À semelhança do procedimento para o controlo de nível, fez-se uso das potencialidades do LabView no desenvolvimento de *software* SCADA para que fosse possível a leitura e escrita dos sinais elétricos no PLC CX9020.

4.4.1 – LABeq Lab Suite: módulo LabPasteur

Este módulo foi desenvolvido com o intuito de possibilitar a monitorização e controlo de toda a unidade PCT23 durante o processo de pasteurização, oferecendo uma interface intuitiva que permite ao utilizador uma leitura fácil dos parâmetros processuais da unidade e acompanhar a sua evolução ao longo do tempo. Em suma, este módulo oferece as seguintes funcionalidades:

- Leitura, escrita e exportação de sinais registados;
- Controlo de nível e de temperatura;
- Controlo manual ou automático das bombas, válvulas e resistência elétrica de aquecimento;
- Implementação de algoritmos com diferentes modos de operação da unidade pré-programados;
- Alteração manual e em paralelo dos parâmetros de calibração dos equipamentos, set-point de controladores e limites de controlo;
- Modo *Debug* que permite que o módulo opere sem estar ligado ao equipamento, permitindo a sua utilização fora do contexto laboratorial, seja durante a preparação da atividade experimental, seja como material de apoio no ensino de outras disciplinas;
- Alteração em tempo real de parâmetros do modelo matemático desenvolvido.

Na Figura 29 encontra-se apresentada a interface Homem-máquina proposta para este módulo, evidenciando o equipamento experimental e os vários modos de operação e configuração.

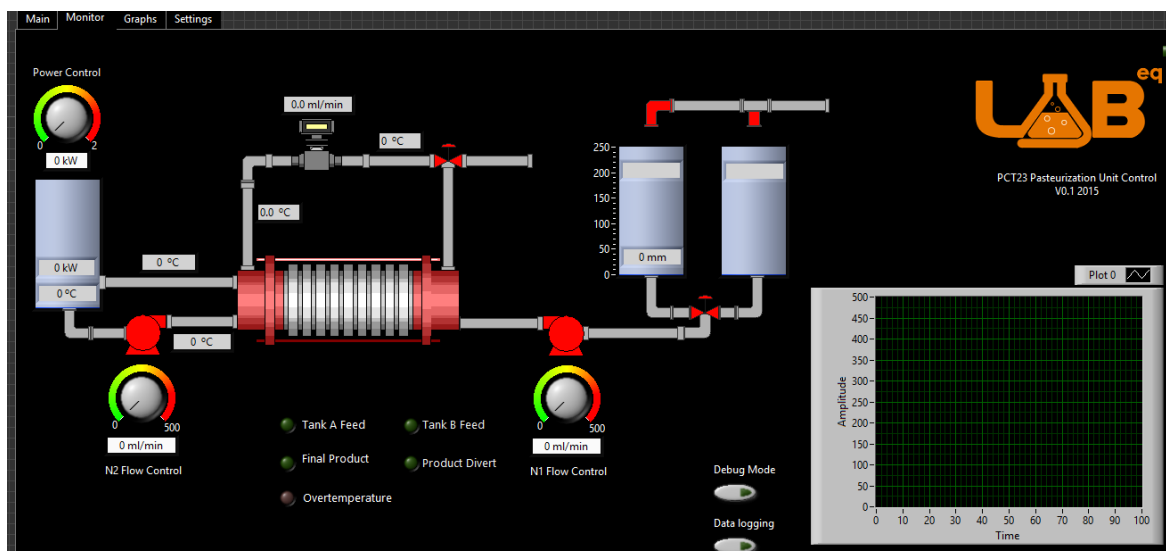


Figura 29- Módulo LabPasteur desenvolvido para monitorização e controlo da unidade PCT23 durante o processo de pasteurização

4.5 – Conclusões

Embora seja um equipamento que se encontre totalmente funcional, a unidade PCT23 ainda está dependente de software e hardware desatualizado, tornando-se mais difícil a sua substituição e reparação face a eventuais falhas. A substituição do PLC SLC500 originalmente instalado por um equipamento mais moderno como o PLC CX9020 permitiu garantir a sua operabilidade no futuro e quebrar a dependência que a unidade PCT23 tinha com tecnologias antigas, sem ser necessário proceder a mudanças estruturais do equipamento, sendo que todas as alterações efetuadas são facilmente reversíveis permitindo voltar a operar a unidade na sua configuração original.

O desenvolvimento de *software* SCADA assente numa linguagem de alto nível como é o LabView® permitiu ainda incluir novas funcionalidades ou melhorar as existentes, tornando o equipamento ainda mais versátil em termos da possibilidade de desenvolvimento de novas atividades experimentais que podem ir desde o estudo de estratégias de controlo mais complexas a estudos de fenómenos de transferência de calor, passando pelo estudo integral do funcionamento de uma unidade de pasteurização. Além disso, o *software* desenvolvido pode ser facilmente alterado para incluir novas funcionalidades ou novos modelos processuais, permitindo que também seja usado fora do contexto laboratorial, ou desconectado da unidade PCT23 para que possa ser usado na

preparação de atividades experimentais ou como material auxiliar no leccionamento de disciplinas relacionadas com a temática.

Com o intuito de testar o PLC CX9020 e o *software* desenvolvido, realizaram-se alguns ensaios com o equipamento. No ensaio de controlo de nível, foi possível comprovar o bom funcionamento quer do PLC quer do módulo LabDS, obtendo resultados dentro do que era esperado, isto é, análogos aos resultados que se obteriam com o equipamento na configuração original. De frisar também que os modelos desenvolvidos para os processos de carga e descarga dos tanques ajustam de forma bastante satisfatória os dados experimentais em vários ensaios, pelo que podem ser aplicados em estratégias de controlo baseadas em modelos processuais ou na análise e preparação de atividades experimentais.

5 – Coluna de pratos descontínua

5.1 – Descrição do equipamento experimental

Em termos de equipamento, a coluna de destilação de pratos disponível no laboratório é constituída por um balão de destilação com uma capacidade útil de 2L, com 50 cm de altura máxima e com possibilidade de alimentação lateral, uma manta de aquecimento de potência regulável até um máximo de 1500W, uma coluna com 5 pratos perfurados, dois condensadores em espiral para o topo da coluna e para o topo do sistema de recolha de destilado, um balão de recolha de destilado, uma válvula solenoide para controlo da razão de refluxo e um conjunto de termopares distribuídos pelo equipamento (manta de aquecimento, balão de destilação, um em cada prato perfurado e dois na secção que precede o condensador da coluna). Existe também acoplada uma consola de controlo capaz de representar os valores das temperaturas registadas e controlar os tempos de abertura e fecho da válvula solenoide. Na Figura 30 é apresentado um esquema com a montagem do equipamento da coluna, evidenciando os termopares instalados.

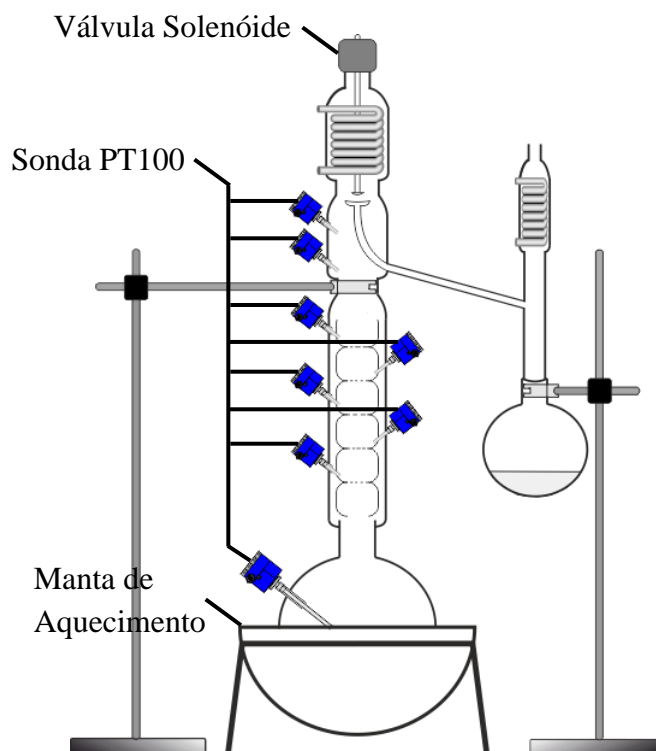


Figura 30 - Equipamento experimental da coluna de pratos

5.2 – Acoplamento do PLC Beckhoff CX9020

Embora a consola de controlo acoplada à coluna de destilação permita efetuar as operações mínimas necessárias à operação da mesma, existe um conjunto de valências que permitiriam expandir a versatilidade e melhorar a operabilidade da coluna que a consola de controlo não apresenta. À semelhança do que se verificava com o condutímetro Russel RL105 que era usado na atividade do estudo da curva DTR, a consola de controlo não permite o registo automático dos sinais medidos obrigando o operador a registar manualmente esses valores. Por outro lado verificou-se que a consola de controlo não está a ser capaz de controlar a potência da manta através de um potenciómetro. Face a estas deficiências e tendo por base as funcionalidades do CX9020 demonstradas na aplicação na unidade PCT23, propôs-se implementar este PLC no sistema como substituto da consola de controlo disponível.

Ao contrário do que se verificava com a unidade PCT23, a comunicação entre os instrumentos do processo e a consola de controlo é apenas efetuada através de um conjunto de cabos (2 cabos DB25 com sinais analógicos e um cabo Centronics de 36 pinos com sinais digitais), facilitando assim a análise à forma de implementação do PLC.

5.2.1 – Identificação dos sinais elétricos no equipamento

À semelhança do que foi efetuado no capítulo 4.2, foi necessário proceder à identificação e mapeamento dos sinais elétricos na unidade para que fosse possível determinar que terminais EtherCAT eram necessários instalar no CX9020. Neste procedimento procedeu-se apenas à identificação e mapeamento dos sinais nos cabos de comunicação com a consola de controlo.

- **Identificação dos sinais nos conectores DB25**

Nos cabos DB25 são transmitidos apenas os sinais analógicos de 0 a 5V correspondentes aos termopares, sendo que a identificação destes sinais foi efetuada fazendo uso da documentação disponível [32] [33] [34]. Nas figuras 31 e 32 encontram-se apresentadas as correspondências entre os pinos dos conectores e os sinais transmitidos.

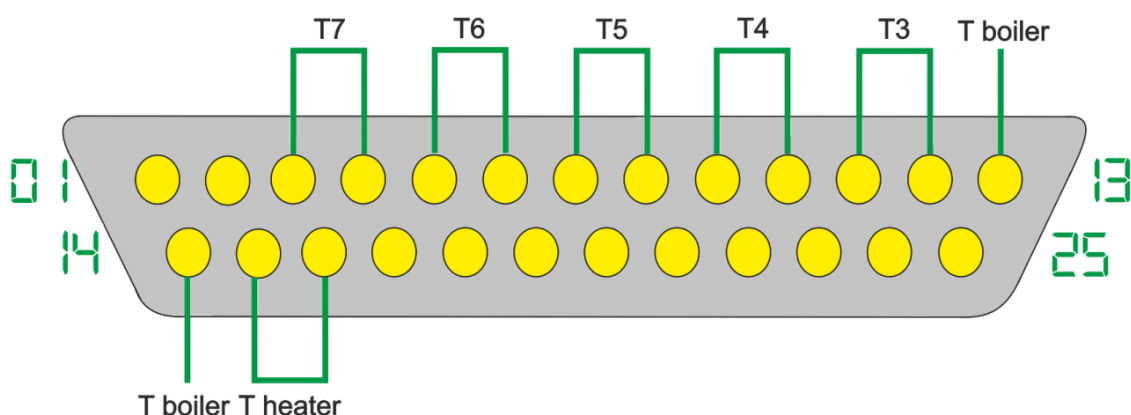


Figura 31 - Sinais elétricos no conector DB25 n°1

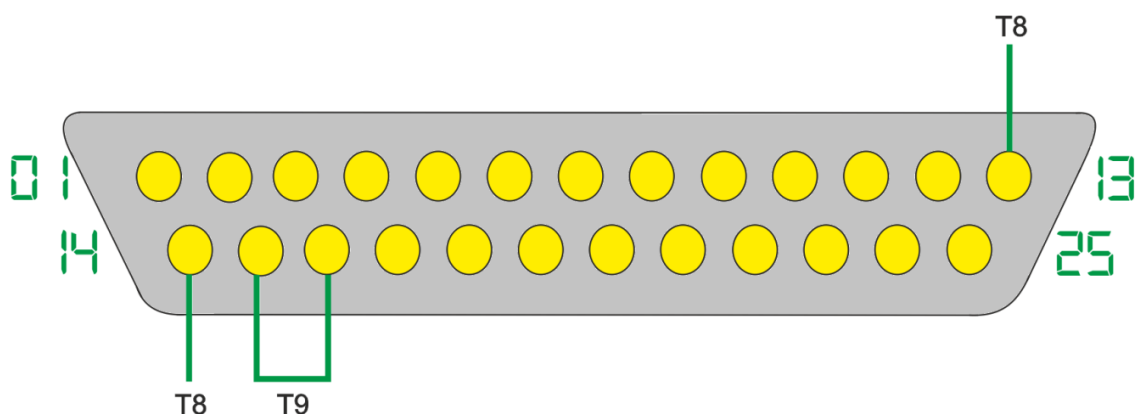


Figura 32 - Sinais elétricos no conector DB25 n°2

- **Identificação dos sinais elétricos no conector Centronics de 36 pinos**

Neste conector são transmitidos os sinais digitais correspondentes aos alarmes, controlo da abertura e fecho da válvula solenoide de regulação da potência da manta, tendo a sua identificação sido realizada tendo por base a documentação existente [35]. Na Figura 33 encontra-se representada a correspondência entre os pinos do conector Centronics e os sinais elétricos [36].

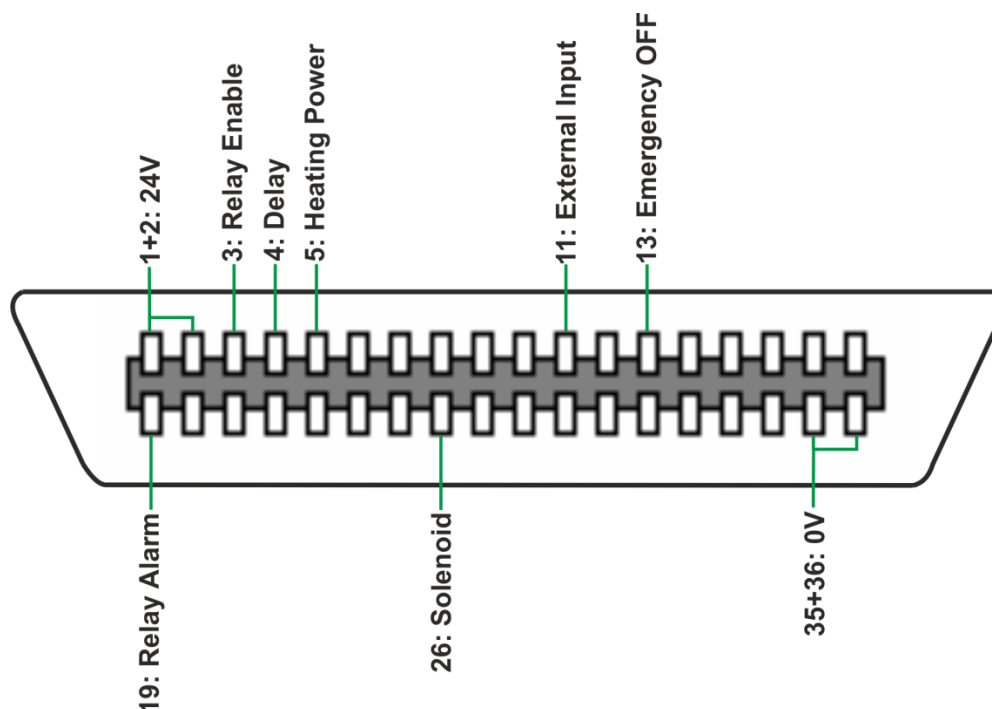


Figura 33 – Sinais elétricos no conector Centronics de 36 pinos

Face aos sinais determinados e a sua natureza, verificou-se que os terminais EtherCAT adquiridos para implementação na unidade de pasteurização eram suficientes para a leitura e escrita dos sinais da coluna, não sendo por isso necessária a aquisição de novos terminais.

5.3 – LABeq Lab Suite: coluna de destilação (LabDestil)

Analogamente aos outros módulos desenvolvidos para os casos de estudo anteriores, o módulo LabDestil foi escrito tendo por base as funcionalidades do LabView® e as necessidades funcionais inerentes ao equipamento. Em termos funcionais este programa é capaz de monitorizar, representar e registar os sinais elétricos alimentados ao PLC CX9020, bem como controlar a potência da manta e a razão de refluxo do condensador da

coluna, colmatando assim as deficiências apresentadas pelo *software* que acompanha a consola de controlo. Na Figura 34 encontra-se apresentada a interface Homem-Máquina do módulo LabDestil.

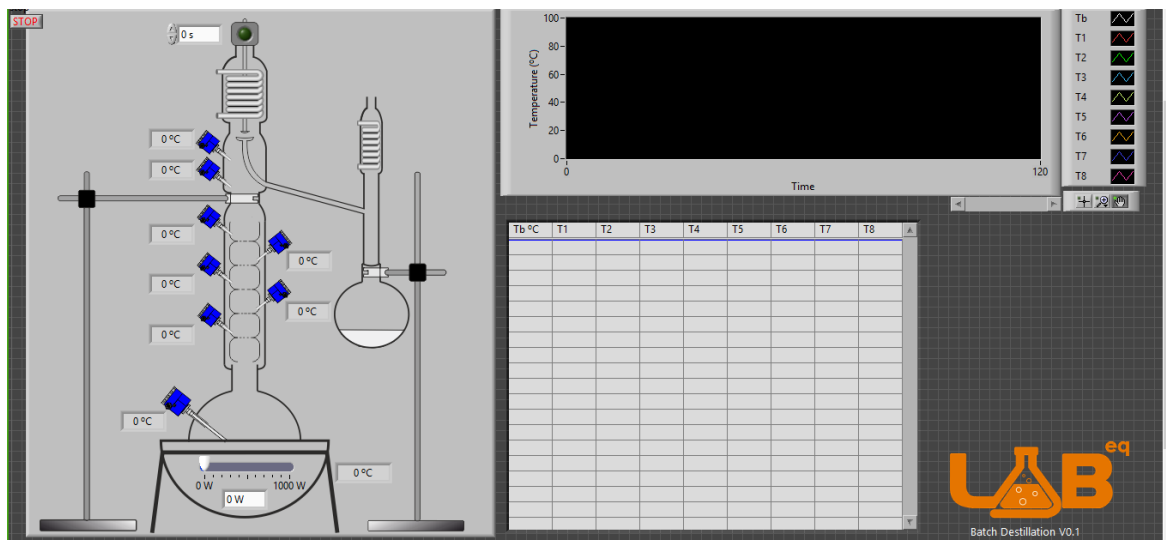


Figura 34 - Interface Homem-Máquina para o módulo LabDestil

5.4 – Caso de estudo: recuperação de solventes

Devido a motivações de origem ambiental, legal e económica, a separação e recuperação de solventes tem-se tornado num processo essencial na indústria química que ainda se encontra muito dependente do uso de solventes orgânicos. No entanto, os mesmos pressupostos são válidos à escala laboratorial motivo pelo qual existe a preocupação de recuperar, sempre que possível, todos os solventes que são utilizados nos laboratórios da Universidade de Aveiro. A separação de uma mistura multicomponente através de destilação batch é um excelente caso de estudo para os laboratórios de Engenharia Química visto permitir aos alunos consolidarem conhecimentos acerca deste processo de separação tão importante para a indústria. Perante este motivo, foi desenvolvida uma atividade experimental que visa avaliar qualitativamente a evolução de uma destilação descontínua de uma mistura ternária parcialmente imiscível (água – etanol – ciclohexano) com composição molar 0.032/0.124/0.844. Um dos métodos aplicáveis ao estudo de destilações descontínuas de sistemas ternários é através da análise de curva de resíduos.

5.4.1 – Mapa de curvas residuais

A separação de misturas multicomponente azeotrópicas e parcialmente imiscíveis, tal como é o caso da mistura em estudo, tem revelado ser um processo bastante comum na indústria e por esse motivo torna-se imperativo o estudo e caracterização do mesmo. Nos últimos anos tem havido uma forte aposta no estudo do comportamento em estado dinâmico de destilações deste tipo de misturas, daí que o conceito de curva de resíduos tenha surgido para facilitar a análise gráfica deste tipo de processos [13]. Simplificadamente, pode-se definir uma curva de resíduo como uma representação gráfica num diagrama de fases das mudanças de composição de uma mistura durante um processo de destilação, sendo que ao conjunto de várias destas curvas se pode dar o nome de mapa de curvas de resíduos (RCM). Normalmente, nestes mapas encontram-se representados os pontos azeotrópicos, curva de miscibilidade e linhas de equilíbrio (se aplicável) e ainda as fronteiras de destilação. Na Figura 35 encontra-se representado um diagrama ternário para a mistura em estudo à pressão absoluta de 0.994 bar, evidenciando os pontos azeotrópicos, fronteira de destilação e ainda a curva de miscibilidade e respetivas linhas de equilíbrio, e que foi calculado usando o modelo UNIFAC, cuja aplicabilidade se encontra validada pela literatura [37] [38]. De referir que este diagrama foi obtido usando o *software* Aspen Plus V7.3 com as bases de dados LLE-ASPEN e VLE-IG.

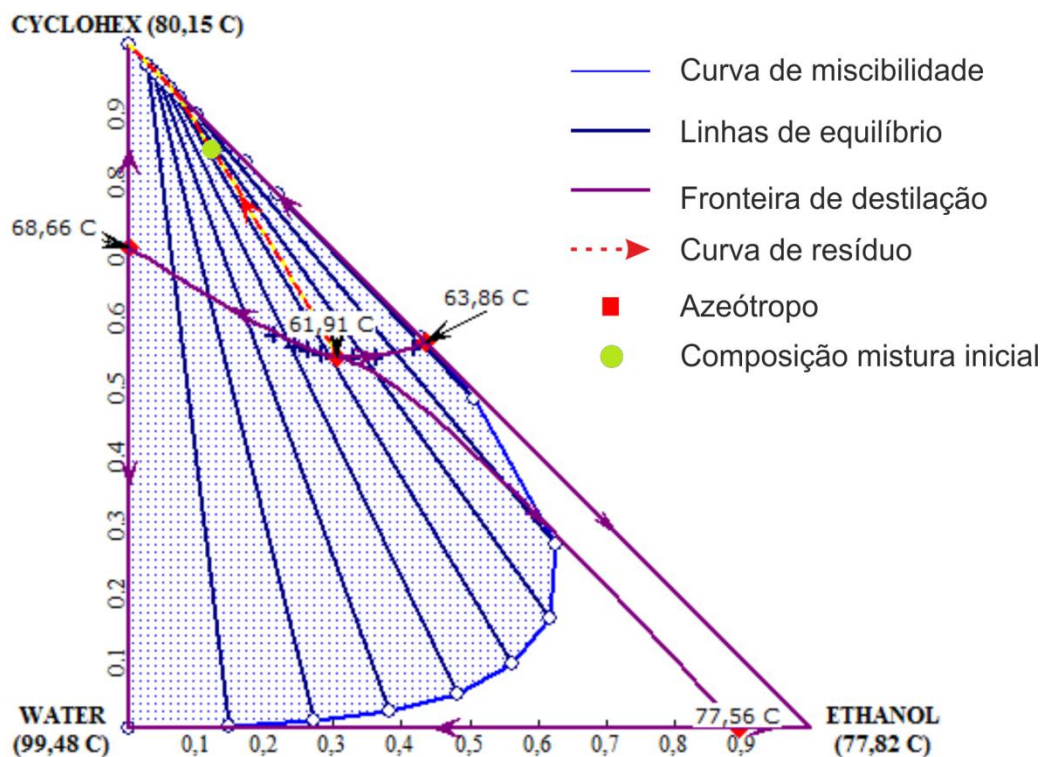


Figura 35 - Diagrama ternário da mistura água-etanol-ciclohexano a 0,994 bar usando UNIFAC como modelo termodinâmico

5.4.2 – Resultados experimentais

Nesta atividade experimental procedeu-se à destilação de uma mistura de água-etanol-ciclohexano a 0.994 bar, numa operação a refluxo total até se atingir o estado estacionário, sendo que de seguida se iniciou a operação a refluxo parcial com uma razão de refluxo mássico de 3 durante 45 minutos. De seguida, efetuou-se a simulação de processo às condições operatórias usando o *software* Aspen Plus V7.3 e o módulo BatchSep. Tal como no caso da determinação da RCM, foi usado o modelo UNIFAC como modelo termodinâmico. Na Figura 36 encontram-se representados os resultados experimentais bem como os resultados da simulação. De referir que foram omitidos os pontos experimentais relativos ao período entre o início da destilação e o estado estacionário em refluxo total, e os dados relativos a todos os termopares exceto do balão de destilação, prato nº3 e de topo da coluna, a fim de simplificar a sua leitura numa representação gráfica.

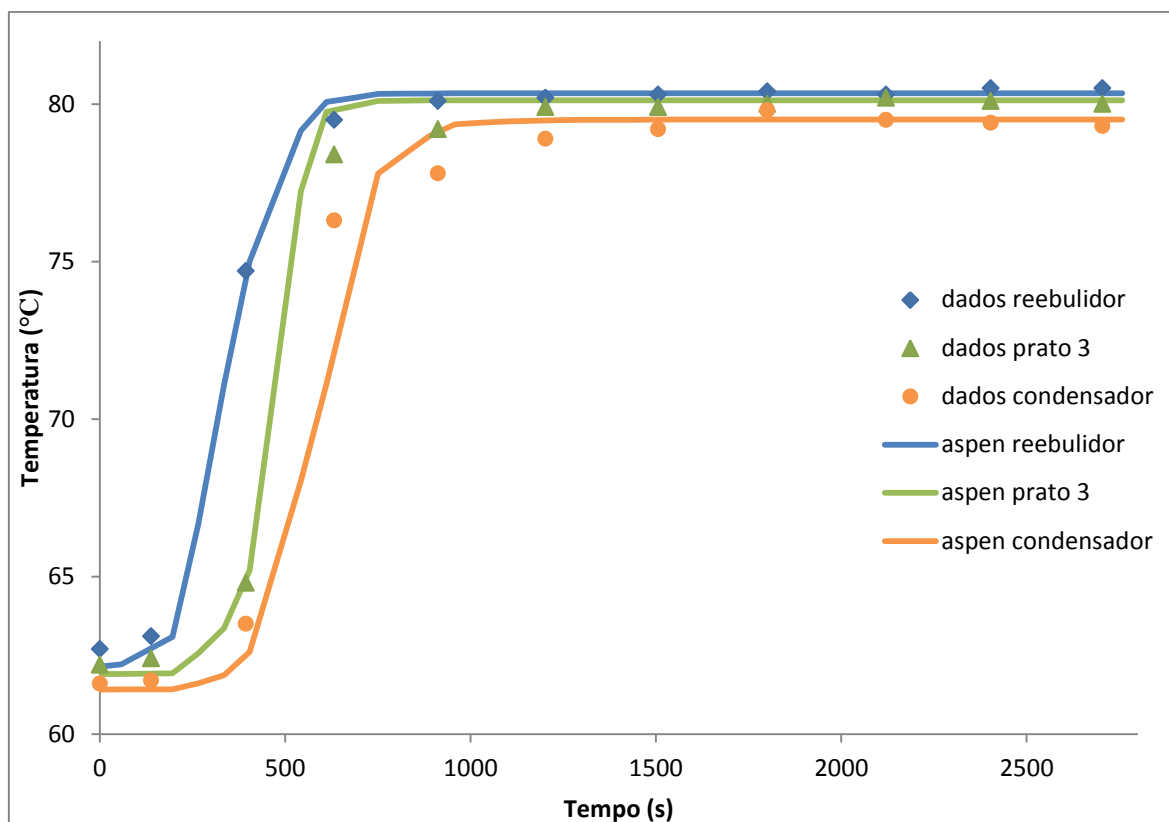


Figura 36 - Temperaturas registadas pelos termopares do reebulidor, prato nº 3 e condensador e resultados da simulação para operação com razão de refluxo de 3

Como se pode observar pela Figura 36, a simulação do processo consegue ajustar de forma aceitável os dados experimentais nas fases iniciais e finais da atividade, apresentando desvios significativos nas zonas onde a variação de temperatura com o tempo é de maior magnitude. Existem alguns aspetos que ajudam a compreender estes desvios, tais como o facto de na simulação se ter assumido que não existiam trocas de calor com o meio envolvente e que não havia perda de carga ao longo da coluna estando a operar às condições de pressão do laboratório (0,994 bar), e por este motivo existe a possibilidade de a coluna simulada não ser uma exata correspondência à coluna real. No entanto, este ponto não inviabiliza o uso desta simulação do desenho e estudo de destilações descontínuas nesta coluna de pratos.

5.5 – Conclusões

Devido à natureza do processo, a instrumentação, automação e controlo de uma coluna de destilação tem sido alvo de um intenso estudo quer por parte da indústria quer numa

vertente mais académica [39]. Por esta razão torna-se importante a inclusão de atividades experimentais incidentes sobre destilação e operação de colunas de destilação em disciplinas de natureza laboratorial no plano curricular de Engenharia Química.

A automação da coluna de destilação de pratos presente nos laboratórios de Engenharia Química da Universidade de Aveiro revelou-se como um excelente caso de estudo e as melhorias associadas a este processo são significativas uma vez que permitirá aumentar a versatilidade do equipamento, sendo possível a execução de destilações mais complexas ao mesmo tempo que permite aos alunos focar a sua atenção no fenómeno físico em vez de na aquisição de dados. A atividade experimental de recuperação de solventes, introduzida no plano de atividades da disciplina de LEQII no ano letivo 2014/15, é um exemplo concreto de como a automação da coluna permite a introdução de novas atividades e o melhoramento da execução das atividades existentes. No entanto há que referir que o processo de automação desta unidade ainda se encontra nos estágios iniciais, havendo por isso potencial para trabalho futuro.

Em relação a resultados experimentais, esta atividade experimental é de cariz puramente qualitativo, no entanto tendo em conta os resultados obtidos é possível concluir que estamos perante uma atividade experimental de elevado interesse pedagógico e que a sua integração no plano de atividades de uma disciplina laboratorial permitirá aos alunos desenvolverem competências na área das destilações descontínuas, análise de curva de resíduos e simulação de processos. De referir que os resultados da simulação em Aspen Plus acompanham a variação de temperatura em vários pontos da coluna de forma satisfatória embora apresentem desvios significativos nos estágios intermédios da destilação onde a variação de temperatura com o tempo é maior. Estes desvios permitem concluir que a coluna simulada poderá não representar a coluna real, no entanto, e tendo por base os resultados obtidos, não se encontra inviabilizado o seu uso no desenho e análise de destilações descontínuas usando esta coluna de pratos.

6 – Conclusões

A automação e instrumentação de unidades experimentais nos laboratórios de Engenharia Química permitiu complementar a oferta de atividades experimentais em disciplinas de cariz laboratorial, quer através da melhoria de funcionamento de alguns

equipamentos, quer através da introdução de novas atividades experimentais. No caso específico do reator tubular deixou de ser necessário proceder ao registo manual dos dados experimentais, sendo que esse processo se encontra totalmente automatizado permitindo aos alunos focar a sua atenção nos fenómenos físicos e químicos decorrentes da atividade em vez de ter a sua atenção centrada na aquisição de dados. Além disso, foi possível propor um sistema supervisor de aquisição de dados e controlo que complementa o funcionamento da atividade, disponibilizando aos alunos novas valências anteriormente inexistentes. Considerando que foi possível efetuar a substituição do sensor antes do início do 2º semestre do ano letivo 2014/15, todo o equipamento e as suas valências já se encontravam ao dispor dos alunos da disciplina e tendo por base os resultados e feedback recebidos é possível concluir que as alterações efetuadas permitiram uma melhor execução da atividade, facilitando também o tratamento dos dados obtidos.

Com o intuito de testar o novo condutímetro, foi efetuada uma atividade experimental de determinação da curva DTR de um reator tubular através de um ensaio de introdução em impulso único. Posteriormente, os dados experimentais recolhidos foram comparados com os resultados de simulação de modelos de reator com e sem o efeito do sensor, tendo sido possível concluir que o modelo de bateria de reatores consegue traduzir de forma mais satisfatória a curva DTR do reator real comparativamente com o modelo de reator tubular com escoamento laminar até agora utilizado nas aulas laboratoriais, embora os resultados não sejam os ideais visto não ser possível representar satisfatoriamente os estágios finais da curva. Neste ponto, a introdução de um termo associado a volume estagnado poderia mitigar esses desvios. A representação dos modelos permitiu também verificar a influência do sensor nos resultados obtidos, tendo-se concluído que embora a sua influência não seja de grande magnitude, graficamente é possível observar que a inclusão do modelo do sensor na modelação do reator permite obter resultados mais próximos aos dados experimentais do que com modelos semelhantes mas sem um termo associado ao sensor.

Em relação à unidade de pasteurização PCT23, e embora esta seja uma unidade que se encontre num estado de perfeito funcionamento, esta encontra-se ainda muito dependente de *software* e hardware desatualizado dificultando a substituição e reparação do equipamento em caso de falha de alguns componentes chave como o PLC instalado ou a placa de comunicação instalada no computador. Após uma análise ao sistema foi possível

concluir que uma substituição do PLC SLC500 por um equipamento mais moderno mitigava as falhas detetadas, tendo sido escolhido o PLC Beckhoff CX9020 como equipamento de substituição. A aplicação do CX9020 na unidade poderia ser efetuada de duas formas (comunicação direta com instrumentos ou substituição do PLC), tendo-se concluído que a substituição direta do SLC500 era o procedimento mais vantajoso uma vez que permitia não só manter a utilização dos restantes equipamentos instalados como a consola de controlo e unidade de falhas, mas também permitir que a comunicação com o PLC continue a ser efetuada através de um conector próprio (IDC50) não havendo por isso a necessidade de proceder a mudanças na instalação. Para complementar o funcionamento do equipamento foi projetado um pacote de *software* SCADA com funcionalidades análogas ao software proprietário da unidade PCT23, mas que apresentasse o potencial de introdução de novas funcionalidades como a inclusão de modelos matemáticos ou sistemas de controlo mais avançados.

Com o intuito de testar as mudanças efetuadas foram realizados dois casos de estudo à unidade. No primeiro caso procedeu-se ao estudo da dinâmica de um sistema de dois tanques para um processo de carga/descarga análogo a uma atividade laboratorial presente na disciplina de LEQII, sendo que os resultados experimentais foram usados na elaboração de modelos matemáticos que descrevem a variação de nível de um dos tanques em função de várias etapas do processo ou perturbações do sistema. A aplicação destes modelos permitiu obter resultados bastante satisfatórios concluindo-se assim que estes modelos podem ser aplicados na preparação e análise de atividades experimentais ou até mesmo no desenvolvimento de estratégias de controlo baseadas em modelos matemáticos. No segundo caso de estudo procedeu-se à análise da implementação do CX9020 num processo de pasteurização, tendo-se desenvolvido *software* SCADA que englobasse as funcionalidades indispensáveis ao correto funcionamento da unidade, mas também novas funções como o modo Debug.

Por fim, a automação de uma coluna de destilação de pratos em operação descontínua permitirá que os alunos foquem a sua atenção na execução e análise do processo em vez da aquisição de dados, sendo esta uma situação análoga ao que se verificava com o reator tubular. Neste ponto verificou-se que a substituição da consola de controlo da coluna pelo PLC CX9020 revelou ser uma hipótese válida, graças à versatilidade do equipamento que

ficou demonstrada na aplicação na unidade PCT23. Foi também proposta a criação de *software* SCADA que permitisse não só fazer a monitorização e registo dos sinais dos sensores mas também proceder ao controlo da potência da manta e tempos de abertura e fecho da válvula solenoide instalada no topo da coluna, permitindo o desenvolvimento e implementação de novas atividades experimentais, complementando assim o leque de atividades disponíveis nos laboratórios de Engenharia Química da Universidade de Aveiro.

A atividade experimental de recuperação de solventes é um excelente caso de estudo para testar as novas funcionalidades inerentes ao uso do CX9020, sendo também um excelente exemplo de como a automação de uma unidade permite o desenvolvimento e implementação de novas atividades experimentais, permitindo aos alunos que possam por em prática conhecimentos previamente adquiridos, enquanto desenvolvem novos conhecimentos na área da simulação e modelação de processos.

7 – Perspetivas de trabalho futuro

Considerando o potencial de desenvolvimento e melhoria de alguns sistemas desenvolvidos no âmbito desta dissertação, existe a possibilidade de continuar o desenvolvimento do trabalho iniciado nesta dissertação. Neste ponto destaca-se a melhoria do *software* SCADA desenvolvido através da implementação de novas funcionalidades, *loops* de controlo, e melhorias do aspeto gráfico das interfaces Homem-Máquina.

Considerando que o processo de automação da coluna de destilação ainda se encontra nos estágios iniciais, sugeria-se que o conjunto de atividades em falta fosse englobado no plano de trabalho de um novo projeto, nomeadamente a determinação da calibração dos sensores da coluna e respetiva implementação no módulo LabDestil, e o desenvolvimento de um adaptador de conectores semelhante ao construído para a unidade PCT23.

Bibliografia

- [1] W. F. Furter, History of Chemical Engineering, 1^a ed., Washington: American Chemical Society, 1980.
- [2] D. Seborg and D. Mellichamp, Process Dynamics and Control, 3^a ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [3] S. M. Ranade, H. Salazar and L. A. Rodriguez, “Process control: Domains, disciplines and cognitive difficulties,” *Education for Chemical Engineers*, vol. 7, no. 1, pp. e1-e6, 2012.
- [4] R. J. dos Santos, F. A. F. Silva, P. J. Carvalho and A. I. Caço, “Instrumentation and Control of Chemical Engineering Laboratories: revamping of actual laboratory practices,” Aveiro, 2015.
- [5] R. L. Shell and E. L. Hall, Handbook of Industrial Automation, 10^a ed., Nova Iorque: Marcell Dekker, 2000.
- [6] G. S. Patience, Experimental Methods and Instrumentation for Chemical Engineers, 1^a ed., Oxford: Elsevier, 2013.
- [7] W. Bolton, Instrumentation and Control Systems, 1^a ed., Oxford: Elsevier, 2004.
- [8] F. R. Ribeiro, F. Lemos and J. M. Lopes, Reactores Químicos, 1^a ed., Lisboa: IST Press, 2002, pp. 119 - 187.
- [9] O. Levenspiel, Chemical Reaction Engineering, 3^a ed., New York: John Wiley & Sons, 1999, pp. 257 - 365.
- [10] C. J. Schaschke, Food Processing, 1^a ed., Londres: Bookboon, 2011.
- [11] Tetra Pak, “Tetra Therm® Lacta,” 2009. [Online]. Available: <http://www.tetrapak.com/DocumentBank/PD63706en.pdf>. [Accessed 23 04 2015].
- [12] J. D. Seader and E. J. Henley, Separation Process Principles, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [13] B. S. Ahmad, “Synthesis of batch processes with integrated solvent recovery,” Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1997.
- [14] I. Mujtaba, Batch Distillation Design and Operation, Londres: Imperial College Press, 2004.
- [15] D. S. Costa, *Sistemas de Supervisão e Controlo Inteligentes*, Aveiro: Universidade de Aveiro, 2009.
- [16] M. S. Thomas, P. Kumar and V. K. Chandna, “Design, Development, and Commissioning of a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Laboratory for Research and Training,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 19, no. 3, pp. 1582-1588, 2004.
- [17] American National Standards Institute, Artist, *IEC 1131-3: a standard programming resource*. [Art]. PLCopen, 1993.
- [18] Siemens, “SCADA System SIMATIC WinCC,” Siemens AG, 2015. [Online]. Available: <http://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/visualization-software/scada/pages/default.aspx>. [Accessed 06 04 2015].

- [19] A. F. Quintã, *Integração de Sistemas de Produção*, Aveiro: Universidade de Aveiro, 2008.
- [20] Crison, “EC-Metro GLP 31,” 2015. [Online]. Available: <http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/conductimetro/de-sobremesa/ec-metro-glp-31>. [Accessed 28 05 2015].
- [21] H. S. Fogler, *Elements of Chemical Engineering*, 4^a ed., New Jersey: Prentice Hall, 2006, pp. 867 - 1000.
- [22] O. Levenspiel, *The Chemical Reactor Omnibook*, Oregon: Lulu, 2013.
- [23] Armfield, *PCT23 Input/Output unit Wiring Diagram*, Ringwood: CDM23055, 1993.
- [24] Armfield, *PCT23 Instruction Manual*, England, 1999.
- [25] Pinouts, “37 pin D-SUB female connector diagram and applications pinouts,” 2014. [Online]. Available: http://connector.pinouts.ru/37_pin_D-SUB_female/. [Accessed 4 3 2015].
- [26] Armfield, *PCT23 Console Wiring Diagram CMD23518*, Ringwood, 1994.
- [27] Allen-Bradley, “DH-485/RS-232C Interface Module,” Milwaukee, 1997.
- [28] Allen-Bradley, “SLC500 Analog I/O Modules,” Milwaukee, 1996.
- [29] Pinouts, “50 pin IDC female connector diagram and applications pinouts,” 2014. [Online]. Available: http://connector.pinouts.ru/50_pin_IDC_female/. [Accessed 26 Fevereiro 2015].
- [30] M. Barr, “Introduction to Watchdog Timers,” 1 10 2001. [Online]. Available: <http://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4023849/Introduction-to-Watchdog-Timers>. [Accessed 26 3 2015].
- [31] J. Lamberson, “Application Note - Single and Multistage Watchdog Timers,” Sensoray, 2012.
- [32] Normschliff Geratebau, “Leistungsteil: PT100 2nd Layer,” Wertheim, 1998.
- [33] Normschliff Geratebau, “Leistungsteil: PT100 1st layer,” Wertheim, 1998.
- [34] Pinouts, “25 pin D-SUB male connector diagram, compatibility and pinouts,” 2014. [Online]. Available: http://connector.pinouts.ru/25_pin_D-SUB_male/. [Accessed 12 06 2015].
- [35] Normschliff Geratebau, “Leistungsteil: Digitalboard,” Wertheim, 1998.
- [36] Pinouts, “36 pin CENTRONICS male connector diagram,” 2014. [Online]. Available: http://connector.pinoutsguide.com/36_pin_CENTRONICS_male/. [Accessed 22 06 2015].
- [37] T. Moriyoshi, Y. Uosaki and T. Yamakawa, “(Liquid + liquid) equilibria of (water + ethanol + cyclohexane) at the temperatures 298.15 K and 323.15 K,” *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 23, no. 1, pp. 37-42, 1991.
- [38] J. R. Elliot and C. T. Lira, *Introductory Chemical Engineering Thermodynamics*, Upper Sadle River: Prentice Hall, 2012.
- [39] A. Górak and H. Schoenmakers, *Distillation: Operation and Applications*, Londres: Elsevier, 2014.
- [40] J. O. Wilkes, *Fluid Mechanics for Chemical Engineers*, Upper Sadle River: Prentice Hall, 2006.
- [41] Crane Valves North America, *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe*, The

Woodlands: Crane Co., 1999.

- [42] R. H. Bishop, Learning with LabView 8, Upper Sadle River: Prentice Hall, 2007.
- [43] T. Dey and W. Wang, “A Survey on ARM Cortex A-series Processors,” University of Virginia, Division of Computer Science, Charlottesville, 2011.
- [44] MeanWell, “MDR-100 series,” 26 11 2013. [Online]. Available: <http://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=mdr-100>. [Accessed 03 07 2015].
- [45] E. Vitikainen, “When do we need calibration of equipment used in testing laboratories?,” Nordtest, Finlândia, 1994.
- [46] E. Wehry, “Quantitative Measurements,” in *Handbook of Instrumental Techniques of Analytical Chemistry*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1997, pp. 73-80.
- [47] J. M. Brown and J. J. Carr, Introduction to Biomedical Equipment Technology, 3^a ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.
- [48] J. Carr, Sensors and Circuits, 1^a ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.
- [49] P. Adamek and W. Dvorak, Artists, *Digital Signal*. [Art]. Wikimedia Commons, 2006.
- [50] Rockwell Software, MicroLogix 1000 and PLC-500 Ladder Logistics, Milwaukee, 1996.

Anexos

A – Modelos matemáticos desenvolvidos

A.1 – Reator tubular com escoamento laminar

Em termos esquemáticos, o escoamento de um fluido num reator tubular e em regime laminar pode ser representado pela Figura 37.

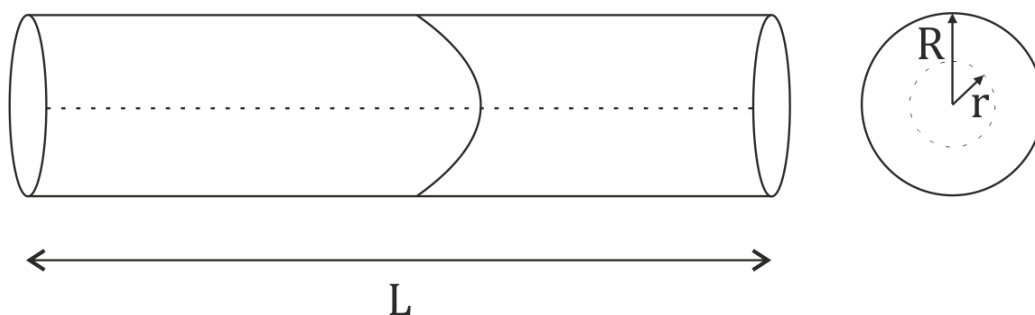


Figura 37 - Escoamento de um fluido num tubo em regime laminar

Uma característica inerente ao escoamento em regime laminar de um fluido num tubo é o facto de o perfil de velocidades do fluido apresentar um formato parabólico, com o fluido no centro do tubo a escoar à velocidade máxima, enquanto que o fluido que se encontra em contacto com as paredes do tubo se encontra parado (Figura 38).

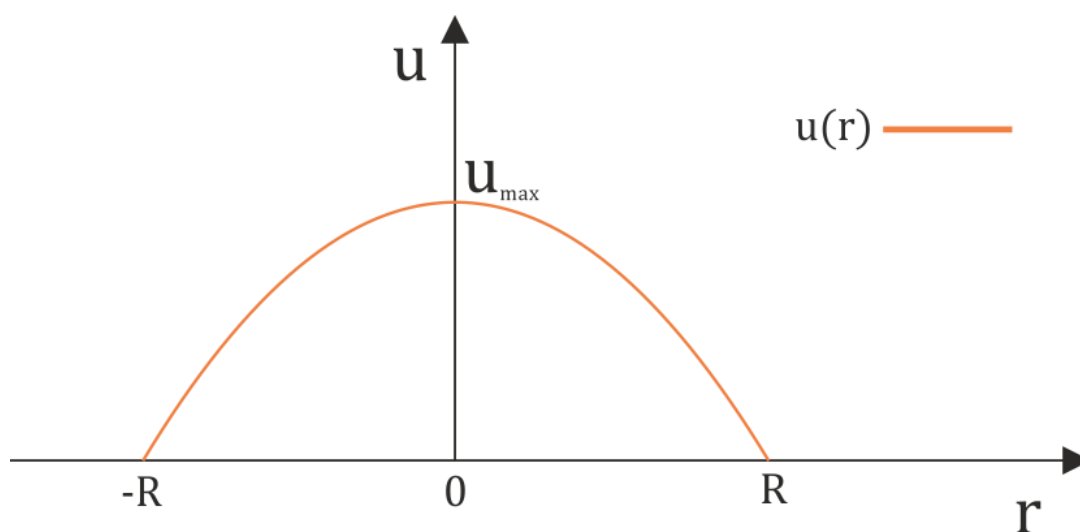


Figura 38 – Perfil de velocidades de escoamento de um fluido num tubo em regime laminar em função da posição radial

Tendo por base a forma de uma equação que define uma parábola e os pressupostos apresentados na Figura 38, pode-se descrever matematicamente o perfil de velocidade de escoamento em função da distância ao centro do tubo através da equação A1.

$$u(r) = u_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (A1)$$

Se considerarmos que, dado o formato geométrico do perfil de velocidades e a velocidade máxima de escoamento do fluido depender das dimensões do tubo e do caudal volumétrico, então $u_{max} = \frac{2Q_{v0}}{\pi R^2}$ logo a equação A1 toma o formato da equação A2.

$$u(r) = \frac{2Q_{v0}}{\pi R^2} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (A2)$$

Assim, o tempo de passagem de um elemento de volume pelo tubo será dado pela equação A3.

$$t(r) = \frac{L}{u(r)} = \frac{\pi R^2 L}{2Q_{v0} \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} \quad (A3)$$

Tendo por base que o tempo de residência é dado por $\tau = \frac{V}{Q_v}$, a equação A3 toma o forma da equação A4.

$$t(r) = \frac{\tau}{2 \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} \quad (A4)$$

Diferenciando a equação em termo da posição radial é possível obter a equação A5.

$$dt = \frac{4}{\tau R^2} \left(\frac{\tau}{2 \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} \right)^2 r dr = \frac{4t^2(r)}{\tau R^2} r dr \quad (A5)$$

A fração de fluido que circula entre r e $r + dr$ pode ser dada pela equação A6.

$$\frac{dQ_v}{Q_{v_0}} = \frac{u(r)2\pi r dr}{Q_{v_0}} \quad (\text{A6})$$

Posto isto, e sabendo que $E(t)dt = dQ_v/Q_{v_0}$, é possível combinar as equações para determinar a expressão que permite calcular a curva $E(t)$ (equação A7).

$$E(t) = \frac{\tau^2}{2t^3} dt \quad (\text{A7})$$

O tempo de residência mínimo do fluido dentro do reator corresponderá à situação em que o fluido circula à velocidade máxima e que pode ser calculado pela equação A8.

$$\tau_{min} = \frac{L}{u_{max}} = \frac{L}{2\bar{u}} \left(\frac{\pi R^2}{\pi R^2} \right) = \frac{V}{2Q_{v_0}} = \frac{\tau}{2} \quad (\text{A8})$$

Consequentemente, a função da distribuição dos tempos de residência num reator tubular com escoamento laminar é dada pela equação A9.

$$E(t) = \left(\frac{\tau^2}{2t^3} \right) * S \left(t - \frac{\tau}{2} \right) , \quad S = \begin{cases} 0 & \text{se } t < \frac{\tau}{2} \\ 1 & \text{se } t \geq \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (\text{A9})$$

A.2 – Série de reatores em ensaio de introdução por impulso

A obtenção da curva DTR pode ser obtida através de um balanço mássico ao *tracer* num ensaio de introdução por impulso único. Na Figura 39 encontra-se apresentado o esquema da bateria de reatores ideais.

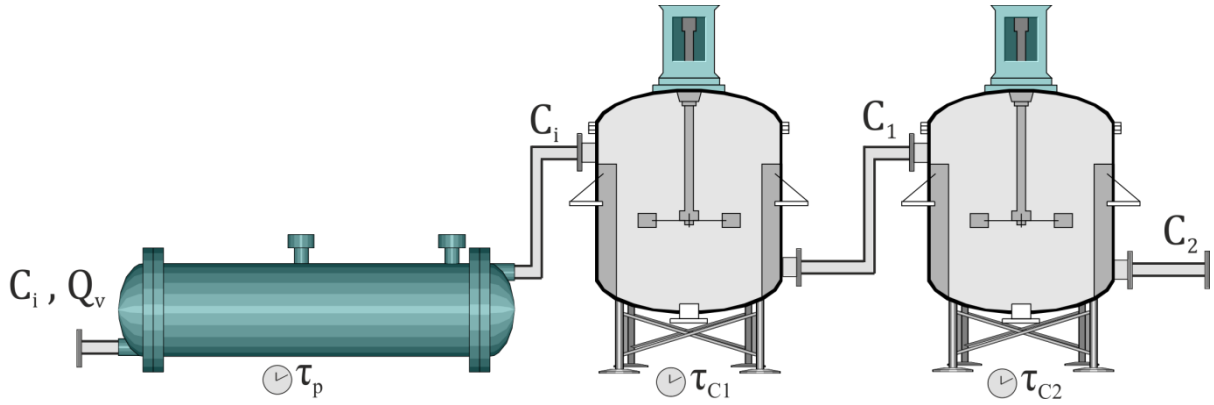


Figura 39 - Esquema de bateria de reatores ideais

A concentração à saída dos reatores perfeitamente agitados é dada pelas equações A11 e A12.

$$C_1 = \frac{C_i}{\tau_{C1}} \quad (A11)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{\tau_{C2}} \quad (A12)$$

O balanço de massa ao *tracer* no segundo RPA é então dado pela equação diferencial de 1ª ordem não homogénea (equação A13), cuja solução possui a forma da equação A14 (solução geral da homogénea + solução particular da não-homogénea).

$$\frac{dC_2}{dt} + \frac{C_2}{\tau_{C2}} = \frac{C_1}{\tau_{C2}} \quad (A13)$$

$$C_2 = C_h + C_{nh} \quad (A14)$$

Tendo por base que se espera que o termo não-homogéneo seja dependente da concentração à saída do primeiro RPA (equação A15), é possível transformar a equação A13 na equação A16.

$$C_{nh} = \alpha C_1 \quad (A15)$$

$$\alpha \frac{dC_2}{dt} + \alpha \frac{C_1}{\tau_{C2}} = \frac{C_1}{\tau_{C2}} \quad (A16)$$

Se atendermos às condições fronteira para um tempo superior ao tempo de residência do PFR (equação A17) é possível rearranjar a equação A16 e determinar o valor do termo α (equação A18).

$$t > \tau_p \Rightarrow \begin{cases} entrada = 0 \\ saída = -\frac{C_1}{\tau_{c1}} \end{cases} \quad (A17)$$

$$\alpha C_1 \left(\frac{1}{\tau_{c2}} - \frac{1}{\tau_{c1}} \right) = \frac{C_1}{\tau_{c2}} \quad (=) \quad \alpha = \frac{1}{\tau_{c2}} \left(\frac{1}{\tau_{c2}} - \frac{1}{\tau_{c1}} \right)^{-1} \quad (A18)$$

Em relação à solução geral da homogénea, esta terá a forma da equação A19.

$$C_h = \gamma e^{\lambda t} \quad (A19)$$

Os parâmetros da equação A19 podem ser determinados através das equações A20 e A21.

$$\lambda + \frac{1}{\tau_{c2}} = 0 \quad (=) \quad \lambda = -\frac{1}{\tau_{c2}} \quad (A20)$$

$$t = 0 \Rightarrow C_2 = 0 = \alpha C_1 + \gamma \quad (A21)$$

Combinando as equações, a solução da equação diferencial pode ser dada pela equação A22.

$$C_2 = \frac{1}{\tau_{c2}} \left(\frac{1}{\tau_{c2}} - \frac{1}{\tau_{c1}} \right)^{-1} C_1 e^{-t/\tau_{c1}} - \frac{1}{\tau_{c2}} \left(\frac{1}{\tau_{c2}} - \frac{1}{\tau_{c1}} \right)^{-1} C_1 e^{-t/\tau_{c2}} \quad (A22)$$

Tendo por base a equação A24, a solução do balanço de massa e a condições fronteira (equação A23), a curva de distribuição de tempos de residência pode ser dada pela equação A25.

$$\begin{cases} t = 0 \Rightarrow C_S = 0 \\ t > \tau_p \Rightarrow C_S = C_2(t) \end{cases} \quad (A23)$$

$$E(t) = \frac{Q_v}{N} C_2(t) \quad (\text{A24})$$

$$E(t) = S(t - \tau_p) \left(\frac{e^{-\frac{t-\tau_p}{\tau_{C_2}}} - e^{-\frac{t-\tau_p}{\tau_{C_1}}}}{\tau_{C_1} \tau_{C_2} * \left(\frac{1}{\tau_{C_1}} - \frac{1}{\tau_{C_2}} \right)} \right), S = \begin{cases} 0 & \text{se } t \leq \tau_p \\ 1 & \text{se } t > \tau_p \end{cases} \quad (\text{A25})$$

A.3 – Modelo para a descarga de tanques

Segundo a hidrostática, o equilíbrio atinge-se quando o resultante das forças aplicadas em todos os pontos à mesma cota é igual a 0. Simplificadamente, podemos afirmar que o equilíbrio é atingido quando na mesma cota as pressões hidrostáticas causadas pela coluna de fluido se igualam (equação A26).

$$P_A|_z = P_B|_z \quad (\text{A26})$$

Por sua vez, a pressão hidrostática pode ser calculada através da equação de Stevin (equação A27) [40] dando origem à equação A28 válida para sistemas com mais do que um tipo de fluido imiscível.

$$P|_z = P_0 + \rho gh \quad (\text{A27})$$

$$P_{A_0} + \sum_{i=1}^n \rho_{A_i} g h_{A_i} \Big|_z = P_{B_0} + \sum_{i=1}^n \rho_{B_i} g h_{B_i} \Big|_z \quad (\text{A28})$$

No caso específico de dois tanques contendo apenas um fluido à mesma temperatura e expostos à mesma pressão externa pode-se simplificar a equação A28 (equação A29).

$$h_A = h_B \quad (\text{A29})$$

Por sua vez, é possível descrever a altura da coluna do fluido através do volume do mesmo e a geometria do tanque, que no caso de tanques cilíndricos dá origem à equação A30.

$$h = \frac{V}{\pi r^2} \quad (\text{A30})$$

Estando a condição de equilíbrio descrita é necessário conseguir calcular o nível de fluidos nos tanques em equilíbrio. Para tal vamos proceder a um balanço de massa entre os dois tanques (equação A31).

$$\frac{dh_A}{dt} = -\frac{dh_B}{dt} \xrightarrow{\text{integrando}} \Delta h_A = -\Delta h_B \quad (\text{A31})$$

Entrando com a condição de nível inicial (equação A32) e a equação A30, a equação A31 toma a forma da equação A33.

$$\frac{\Delta V}{\pi r_A^2} - h_{A_0} = h_{B_0} - \frac{\Delta V}{\pi r_B^2} \quad (\text{A32})$$

$$h_{A_0} + h_{B_0} = \frac{(r_A^2 + r_B^2)V}{\pi r_A^2 r_B^2} \quad (\text{A33})$$

Na situação em que o diâmetro dos tanques é igual ($r_A = r_B = r$) a equação A33 simplifica-se à equação A34.

$$\frac{V}{\pi r^2} = \frac{h_{A_0} + h_{B_0}}{2} \xrightarrow{\text{equação dos } h \text{ e } v/a} h_{eq} = \frac{h_{A_0} + h_{B_0}}{2} \quad (\text{A34})$$

No entanto a equação apenas permite calcular o valor de nível em equilíbrio, não sendo possível descrever a variação de nível nos tanques em função do tempo. Para tal seria necessária uma expressão que combinasse quer o termo em equilíbrio quer um termo diferencial de nível (equação A35), de maneira a que para o estado inicial ($t=0$) a equação tome o valor de h_{A_0} (equação A36), e que no equilíbrio o valor de nível seja igual ao valor de nível em equilíbrio (equação A37).

$$h(t) = h_{eq} + \frac{dh}{dt} \quad (\text{A35})$$

$$\lim_{t=0} h(t) = h_{A_0} \Rightarrow \lim_{t=0} \frac{dh}{dt} = \frac{h_{A_0} - h_{B_0}}{2} \quad (\text{A36})$$

$$\lim_{t=t_{eq}} h(t) = h_{eq} \Rightarrow \lim_{t=t_{eq}} \frac{dh}{dt} = 0 \quad (\text{A37})$$

Um aspeto recorrente das expressões mais comuns sobre a descarga de tanques através de válvulas e orifícios é o facto de o caudal de fluido em escoamento depender proporcionalmente da raiz quadrada de variação da coluna de fluido (equação A38) [40].

$$Q_V \propto \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (=) \quad Q_V \propto \sqrt{\frac{(P_{atm} + \rho gh) - P_{atm}}{\rho}} \quad (=) \quad Q_V \propto \sqrt{h} \quad (\text{A38})$$

No entanto esta expressão é apenas válida no caso do escoamento de um fluido num tanque aberto de forma cilíndrica através de um orifício (Figura 40).

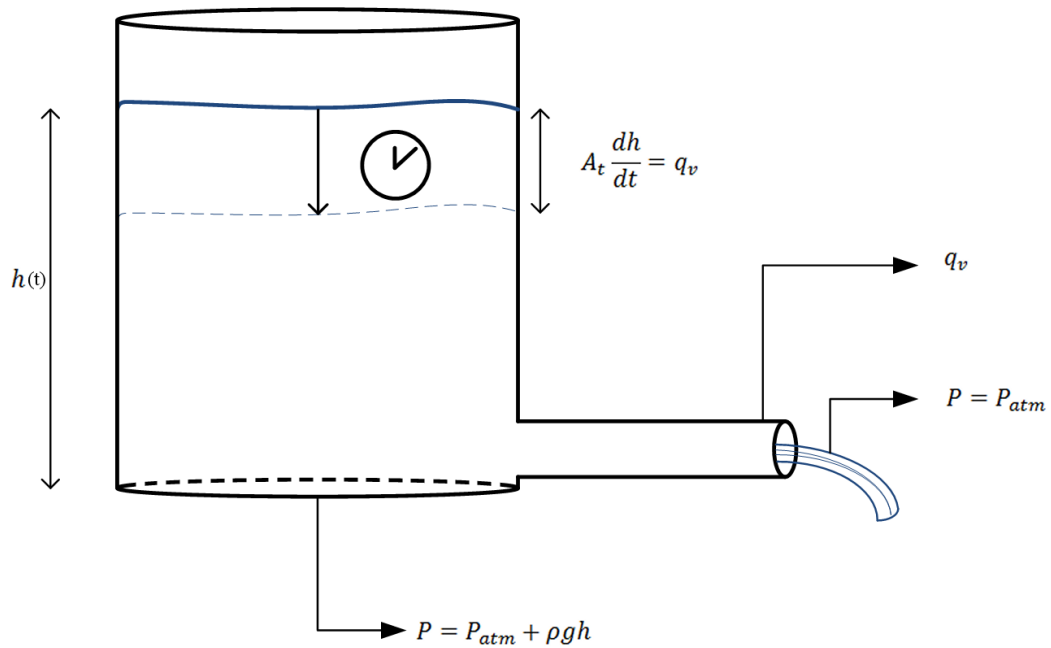


Figura 40 - Descarga de um tanque através de um orifício

Se tivermos em consideração que estamos perante o caso do escoamento de um fluido de um tanque aberto de forma cilíndrica através de um orifício para alimentar um tanque à mesma cota e com a mesma geometria (Figura 41), a expressão que permite o caudal de fluido através do orifício terá de ter em consideração o efeito da pressão hidrostática da coluna de fluido que vai aumentando no tanque de receção. Analogamente ao caso

anterior, é possível estimar que o caudal de fluido vai depender uma vez mais da diferença de pressão entre dois pontos (equação A39).

$$Q_V \propto \sqrt{\frac{(P_{atm} + \rho g h_A) - (P_{atm} + \rho g h_B)}{\rho}} (=) Q_V \propto \sqrt{h_A - h_B} \quad (A39)$$

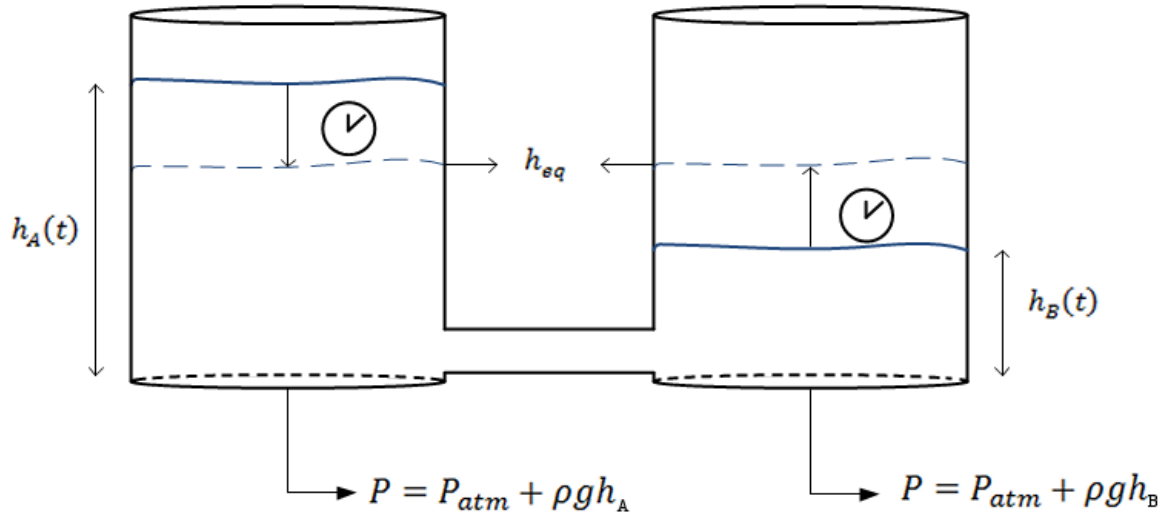


Figura 41 – Processo de descarga do tanque A para tanque B

Atendendo que o valor de nível nos tanques em determinado momento é função de altura inicial de fluido e do tempo decorrido e tendo por base as equações A35 a A37 e vários resultados experimentais, foi possível verificar que a equação A40 consegue ajustar bem a variação do nível de água do tanque A em função do tempo.

$$h_A(t) = \frac{1}{2} \left(h_{A_0} + h_{B_0} + \left(\sqrt{h_{A_0} - h_{B_0}} * \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \right)^2 \right) \quad (A40)$$

Rearranjando a equação colocando em evidência um termo que define o valor do coeficiente experimental da válvula V2 (equação A41) dando origem à equação A42.

$$K_{exp} = A \frac{\sqrt{h_{A_0} - h_{B_0}}}{t_{exp}} \quad (A41)$$

$$h_A(t) = \frac{1}{2} \left(h_{A_0} + h_{B_0} + \left(\sqrt{h_{A_0} - h_{B_0}} - \frac{K_{exp} * t}{A} \right)^2 \right) \quad (A42)$$

No entanto, a equação é apenas válida para o caso do escoamento de um fluido de um tanque para outro através de uma válvula e sem que haja alimentação externa, diminuindo claramente o espectro de atividades em que pode ser aplicada. Com o intuito de aumentar a aplicabilidade deste modelo, derivou-se uma nova expressão baseada nos pressupostos do modelo de descarga de tanques e em resultados experimentais, que permita descrever a variação do nível de fluido no tanque A durante um processo de descarga para o tanque B e com alimentação dos tanques via as válvulas solenoides SOL4 e SOL5 e remoção de água através da bomba N1.

Nesta variante do processo de descarga, o valor do nível em equilíbrio irá depender do nível inicial de fluido nos tanques, da quantidade de fluido alimentada durante o período de descarga e o caudal da bomba N1 (equação A43).

$$h_{eq} = \frac{1}{2} \left(h_{A_0} + h_{B_0} + \frac{(Q_v^{SOL4} + Q_v^{SOL5} - Q_{V_{N1}}) \cdot t}{A} \right) \quad (A43)$$

Por sua vez, o termo que descreve a variação de nível em função do tempo é dado pela equação A44. A dedução deste termo tem por base os mesmos pressupostos do modelo anterior e inclui um termo relativo à coluna de água alimentada através de válvulas solenoides e do caudal da bomba peristáltica, e que foi ajustado tendo por base dados experimentais de atividades experimentais previamente efetuadas. De referir que este modelo não é totalmente preditivo uma vez que é necessário introduzir o valor de tempo experimental (t_f), no entanto esse valor pode ser estimado tendo por base os resultados de ensaios em condições semelhantes.

$$\frac{dh_A}{dt} = \left(\sqrt{h_{A_0} - h_{B_0} + \frac{(Q_v^{SOL4} + Q_v^{SOL5} - Q_{V_{N1}}) \cdot t_f}{A}} * \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \right)^2 \quad (A44)$$

Combinando as equações A43 e A44 é possível obter um modelo que descreve a variação do nível de fluido no tanque A em função do tempo num processo de descarga com influência de alimentação contínua através das válvulas SOL4 e SOL5 e da bomba N1 (equação A45).

$$h_A(t) = \frac{1}{2} \left(h_{A_0} + h_{B_0} + \varphi + \left(\sqrt{h_{A_0} - h_{B_0} + \varphi} * \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \right)^2 \right), \varphi = \frac{(Q_v^{SOL4} + Q_v^{SOL5} - Q_{v_{N1}}) \cdot t_f}{A} \quad (A45)$$

De referir que este modelo toma a forma da equação A40 no caso de não haver alimentação através das válvulas e a bomba N1 se encontre desligada, podendo então ser considerado como uma fórmula geral para este tipo de processos no equipamento.

B – Sinais elétricos nos cabos da unidade PCT23 e coluna de destilação

B.1 – Sinais no cabo IDC37

Tabela 8 – Sinais elétricos no cabo IDC37

Nº de Pin	Nome	Descrição
1	L1	Nível de água no tanque A (0 – 250 mm)
2	F1	Caudal de alimentação (0 -1500 ml/min)
3	T1	Termopar 1: temperatura produto de saída (0 – 150 °C)
4	T2	Termopar 2: temperatura da água na unidade de aquecimento (0 – 150 °C)
5	T3	Termopar 3: temperatura de saída do fluido quente do permutador de placas (0 – 150 °C)
6	T4	Termopar 4: temperatura de saída do fluido frio do permutador de placas (0 – 150 °C)
7	T5	Termopar 5: temperatura de entrada do fluido quente do permutador de placas
9	L1/F1 Return	
10	T1 a T5 Return	
21	H.O.T.	Alarme de sobreaquecimento na unidade de aquecimento (on – off)
22	HLL	Alarme de nível baixo na unidade de aquecimento (on – off)
23	LL	Alarme de nível baixo no tanque B (on – off)
24	HL	Alarme de nível alto no tanque B (on – off)

B.2 – Sinais no cabo Burndy de 24 pinos

Tabela 9 - Sinais elétricos no cabo Burndy de 24 pinos

Nº de Pino	Nome	Descrição
1	N2	Bomba peristáltica da unidade de aquecimento
2	N2 Return	
5	N1	Bomba peristáltica do sistema de tanques
6	N1 Return	
13	SOL1	Válvula de controlo de purga de produto
14	SOL1 Return	
15	SOL2	Válvula de controlo de alimentação de água fria
16	SOL2 a SOL5 Return	GND para válvulas SOL2 a SOL5
17	SOL3	Válvula de escolha de tanque
19	SOL4	Válvula de alimentação de tanque A
21	SOL5	Válvula de alimentação de tanque B

B.3 – Sinais no cabo IDC50**Tabela 10 - Sinais analógicos no cabo IDC50**

Nº de Pin	Nome	Descrição	Tipo de sinal
1	L1	Nível de água no tanque A (0 – 250 mm)	Input Analógico
2	Return		
3	F1	Caudal de alimentação (0 -1500 ml/min)	Input Analógico
4	Return		
5	PWR	Potência de aquecimento (0 – 2 kW)	Input Analógico
6	Return		
7	T1	Termopar 1: temperatura produto de saída (0 – 150 °C)	Input Analógico
8	Return		
9	T2	Termopar 2: temperatura da água na unidade de aquecimento (0 – 150 °C)	Input Analógico
10	Return		
11	T3	Termopar 3: temperatura de saída do fluido quente do permutador de placas (0 – 150 °C)	Input Analógico
12	Return		
13	T4	Termopar 4: temperatura de saída do fluido frio do permutador de placas (0 – 150 °C)	Input Analógico
14	Return		
15	T5	Termopar 5: temperatura de entrada do fluido quente do permutador de placas	Input Analógico
16	Return		
22	N1	Velocidade de rotação da bomba de alimentação de fluido frio ao permutador de placas (0 – 100%)	Output Analógico
23	Return		
24	N2	Velocidade de rotação da bomba de alimentação de fluido quente ao permutador de placas (0 – 100%)	Output Analógico
25	Return		

Tabela 11 - Sinais digitais de entrada no cabo IDC50

Nº de Pin	Nome	Descrição	Tipo de sinal
27	DIG GND		
28	SOL1i	Posição da válvula de purga de produto (Normal – Purgar)	Input Digital
29	H.O.T.	Alarme de sobreaquecimento na unidade de aquecimento (on – off)	Input Digital
30	LL	Alarme de nível baixo no tanque B (on – off)	Input Digital
31	HL	Alarme de nível alto no tanque B (on – off)	Input Digital
32	DIG GND		
33	F.P.S.	Interruptor de N1 (on – off)	Input Digital
34	W.P.S.	Interruptor de N2 (on – off)	Input Digital
35	W.H.S.	Interruptor da resistência elétrica da unidade de aquecimento (on – off)	Input Digital
36	V.C.S.	Interruptor do controlo de válvulas solenoides (on – off)	Input Digital
37	DIG GND		

Tabela 12 - Sinais de Relay e digitais de saída no cabo IDC50

Nº de Pin	Nom e	Descrição	Tipo de sinal	Posição Normal
38	SOL1o	Posição da válvula de purga de produto (Normal – Reciclo)	Output Digital Relay	Normal
39	SOL2	Posição da válvula de alimentação aos tanques (Tanque A – Tanque B)	Output Digital Relay	Tanque A
40	SOL3	Posição da válvula de água fria (on – off)	Output Digital Relay	Fechado
41	WD	Sinal do Watchdog	Output Digital Relay	
42	DIG GND			
43	SOL4	Posição da válvula de alimentação do tanque A (on – off)	Output Digital Relay	Fechado
44	SOL5	Posição da válvula de alimentação do tanque B (on – off)	Output Digital Relay	Fechado
45	IPWR	Aumentar potência da resistência da unidade de aquecimento	Output Digital	
46	DPWR	Diminuir potência da resistência da unidade de aquecimento	Output Digital	
47	DIG GND			

C - Software Utilizado

C.1 – Scilab e o módulo Xcos

O Scilab é um *software open-source* e de distribuição gratuita usado em computação numérica, sendo que atualmente é desenvolvido pelo Scilab Enterprises. Em termos funcionais e sintáticos, o Scilab é bastante semelhante ao Matlab permitindo que a transferência de conhecimentos de um *software* para o outro seja bastante simples e intuitiva. O Scilab ainda contém um pacote gratuito chamado Xcos que pode ser usado no desenvolvimento, modelação e simulação de sistemas dinâmicos implícitos e explícitos e que inclui também subsistemas contínuos e discretos, sendo a alternativa gratuita e open-source ao Simulink.

Devido às semelhanças com *software* licenciado que normalmente é lecionado em disciplinas do plano curricular do curso de Engenharia Química na Universidade de Aveiro e ao facto de ser de distribuição gratuita, o Scilab é uma excelente alternativa a programas como Matlab® e Simulink®, motivo pelo qual foi amplamente utilizado na simulação dos vários modelos propostos. De seguida é feita uma breve apresentação dos diagramas de blocos dos programas desenvolvidos para a simulação dos modelos.

- **Reator tubular com escoamento laminar**

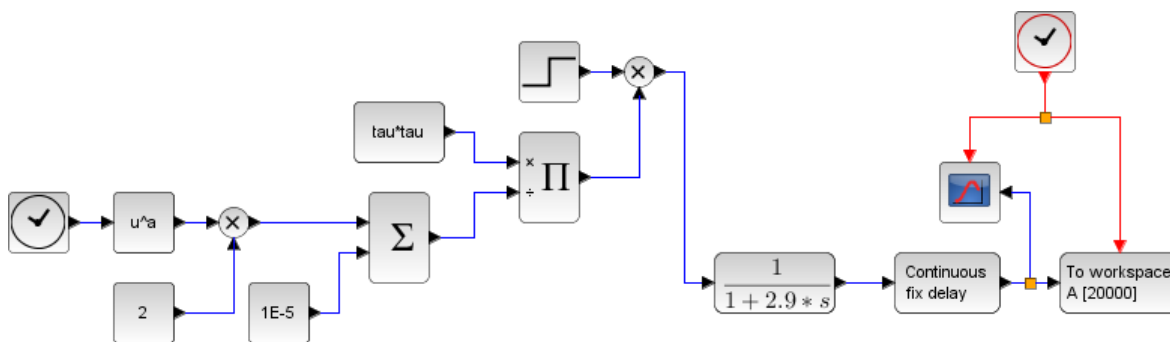


Figura 42 - Esquema de computação do modelo de reator tubular com escoamento laminar com modelo FOPTD do sensor

- **Serie de reatores ideais**

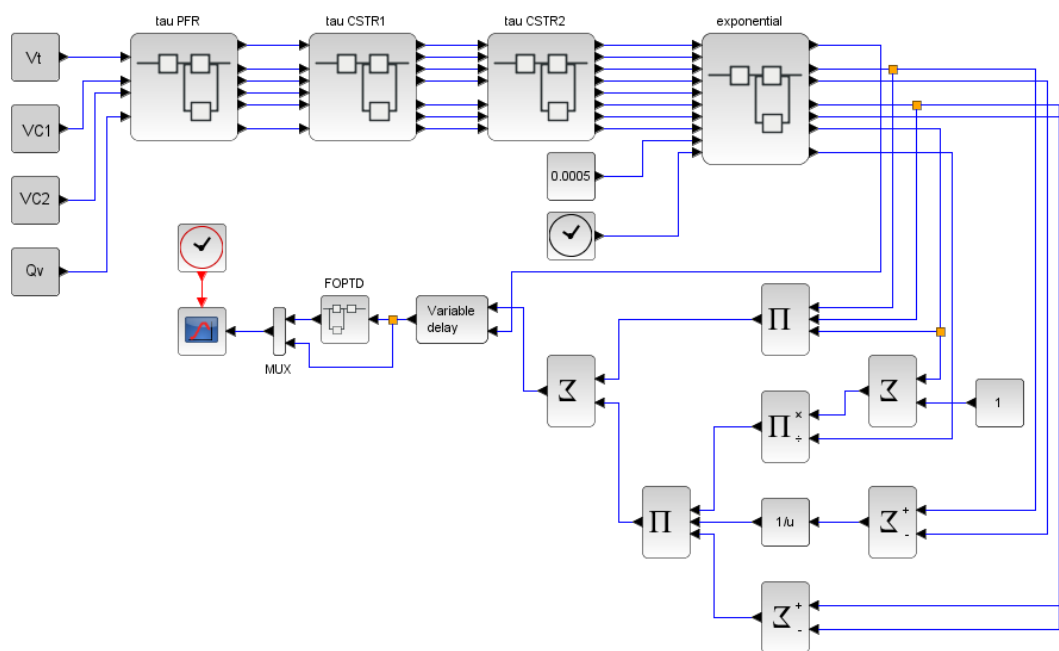


Figura 43 – Diagrama de blocos para o programa de simulação da curva $E(t)$ para uma bateria de reatores ideais

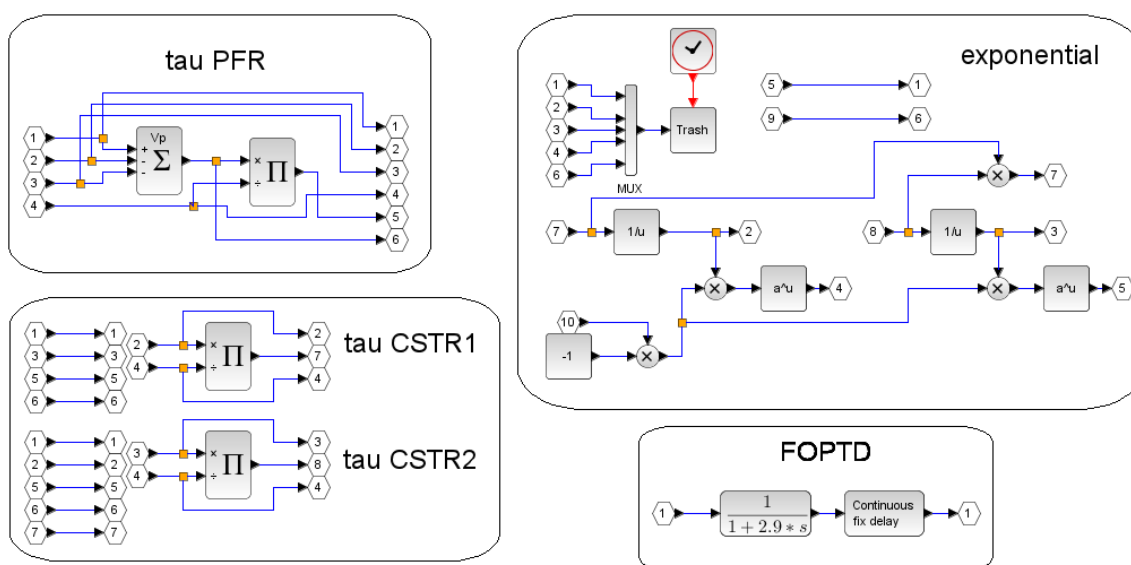


Figura 44 – Diagrama de blocos dos superblocos definidos no programa de simulação da bateria de reatores ideais

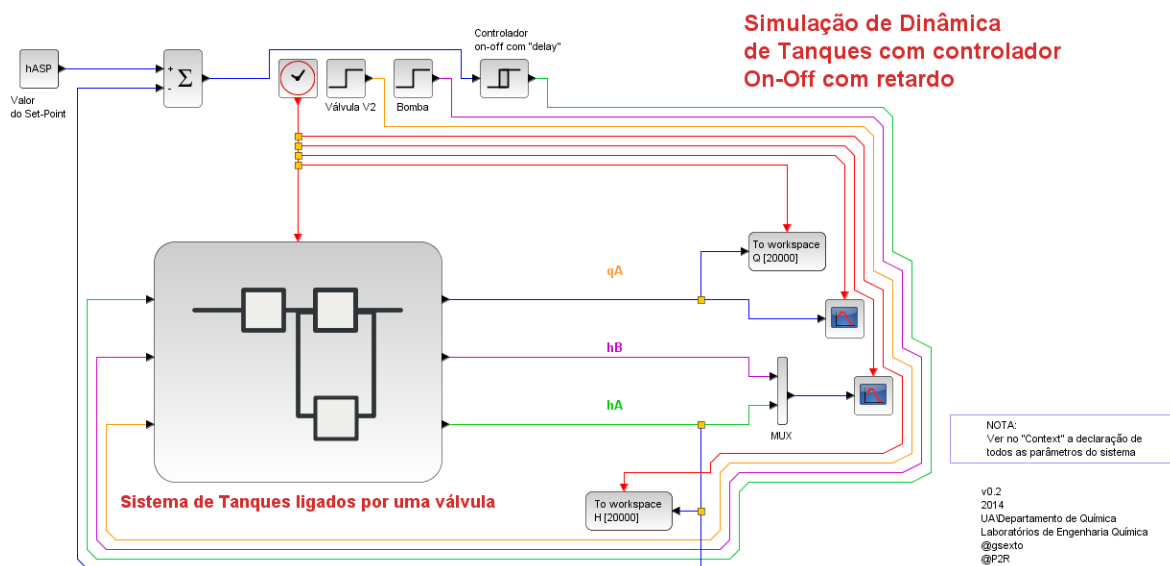


Figura 45 – Programa usado na simulação do modelo de descarga dos tanques

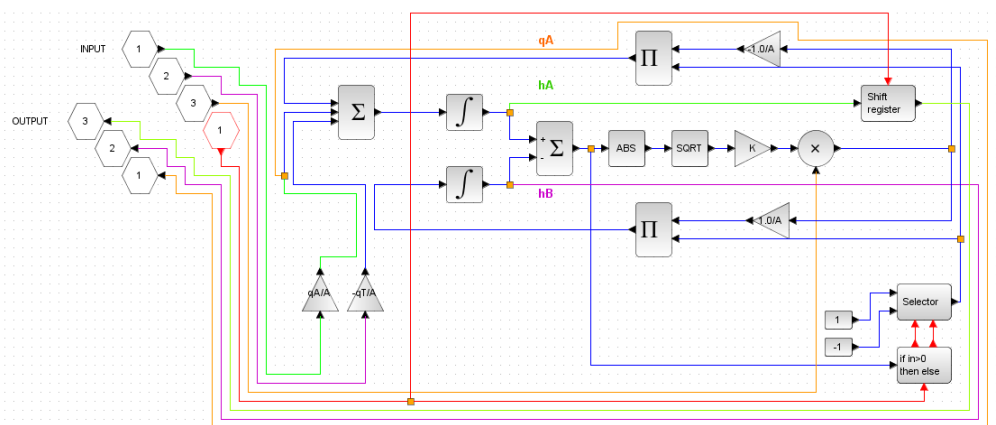


Figura 46 – Superbloco do programa usado na simulação do modelo de descarga dos tanques

C.2 – LabView®

O LabView®, acrónimo de Laboratory Visual Instruments Engineering Workbench, é um *software* de computação em linguagem gráfica desenvolvido pela National Instruments. Embora possa ser usado na computação numérica de expressões matemáticas, o LabView é normalmente utilizado para desenvolver programas aquisição de dados, controlo de instrumentos, processamento de sinal entre outros. Em termos práticos, os programas escritos em LabView® são normalmente constituídos por dois componentes: o painel frontal que contém toda a interface Homem-Máquina, e o diagrama de blocos que contém toda a programação baseado num modelo de fluxo de dados [41]. Na Figura 47 é apresentado um exemplo de um programa escrito em LabView® que permite calcular o

volume de um tanque cilíndrico e massa de água que pode armazenar em função do seu diâmetro e altura.

Existem várias vantagens no uso do LabView face a outros programas tais como:

- Não ser necessário ter conhecimentos sólidos de programação;
- A criação de interfaces gráficas é rápida e intuitiva visto cada elemento se encontrar pré-programado bastando apenas configurar alguns parâmetros;
- Muito dos blocos são polimorfos, isto é, adaptam-se automaticamente à natureza dos dados que são alimentados;
- Existe um largo espectro de bibliotecas que podem ser utilizadas aumentando a versatilidade do *software*;
- A comunidade LabView é de grandes dimensões sendo por isso fácil aceder a conteúdo desenvolvido por terceiros ou encontrar suporte no caso de se encontrar alguma dificuldade.

No entanto existem algumas desvantagens inerentes ao LabView:

- Pequenas alterações no processo podem implicar grandes alterações no programa desenvolvido;
- A criação de *software* muito complexo ou com muitos blocos tende a ser bastante difícil e confusa de ser lida por parte do programador, tornando-se por isso pouco prática;
- Embora haja licenças para estudantes a preços mais reduzidos, uma licença de LabView é normalmente bastante dispendiosa.

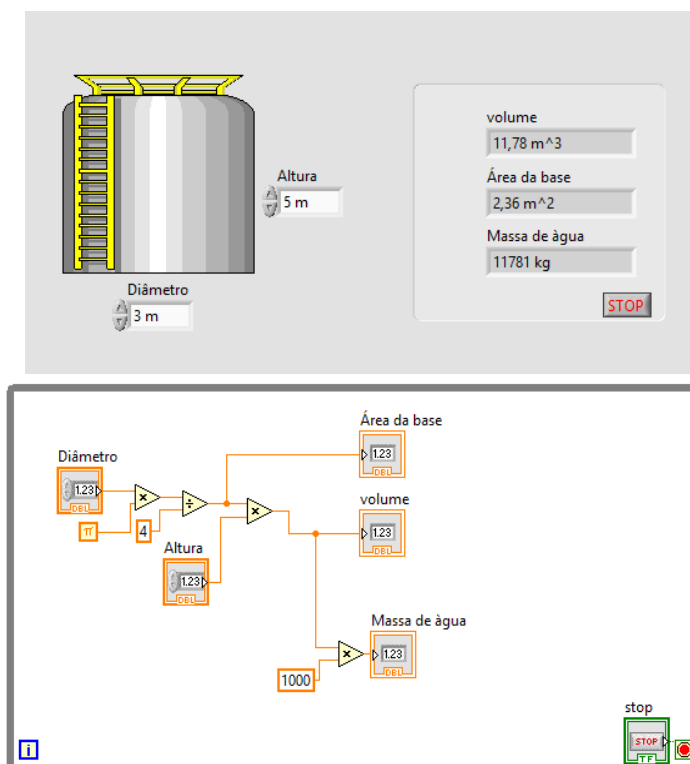


Figura 47 – Exemplo de programa escrito em LabView evidenciando a interface gráfica (topo) e o diagrama de blocos (base)

C.3 – TwinCAT II

O TwinCAT II é um software de automação e controlo desenvolvido pela Beckhoff que permite converter um computador num controlador em tempo-real de um sistema multi-PLC. O TwinCAT pode também ser utilizado na configuração e programação de PLC da Beckhoff como o caso do CX9020, ou na comunicação com outro *software* ou interfaces Homem-Máquina através de protocolos unificados de comunicação industrial (Figura 48).

No âmbito da aplicação do CX9020 na unidade PCT23, o TwinCAT II foi apenas utilizado para programar os protocolos de emergência que estarão guardados na memória do PLC, despoletando uma ação de controlo automática por parte do controlador e que não pode ser contornada ou cancelada pelo utilizador. Na Figura 49 encontra-se apresentado o algoritmo com os protocolos de emergência estabelecidos.

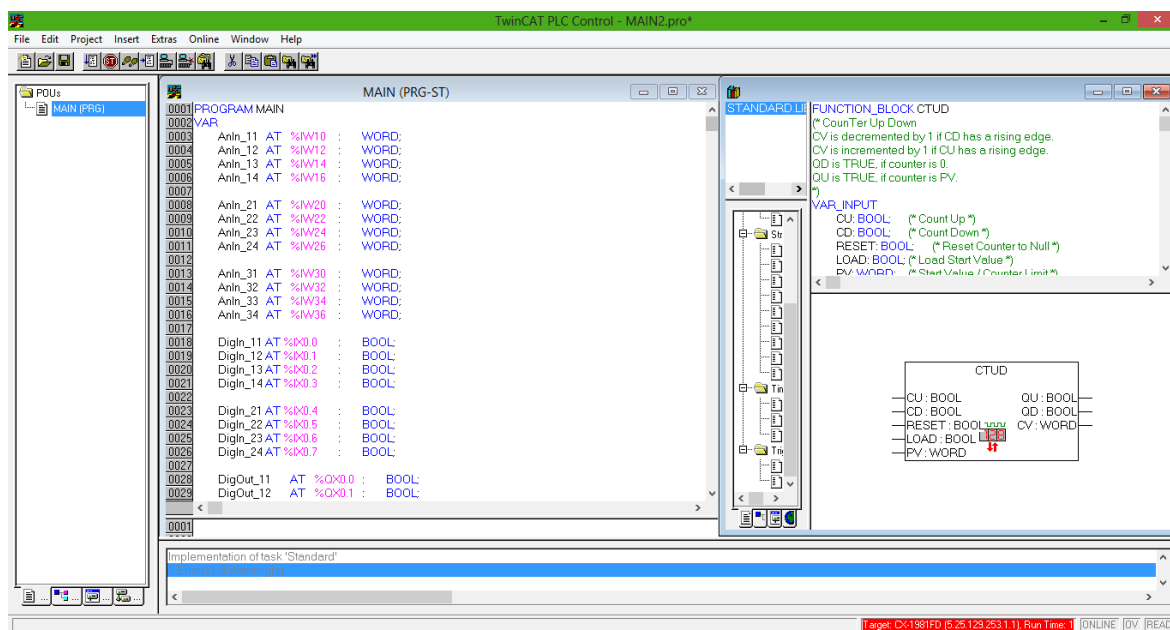


Figura 48 – Uso de TwinCAT na programação do PLC CX9020

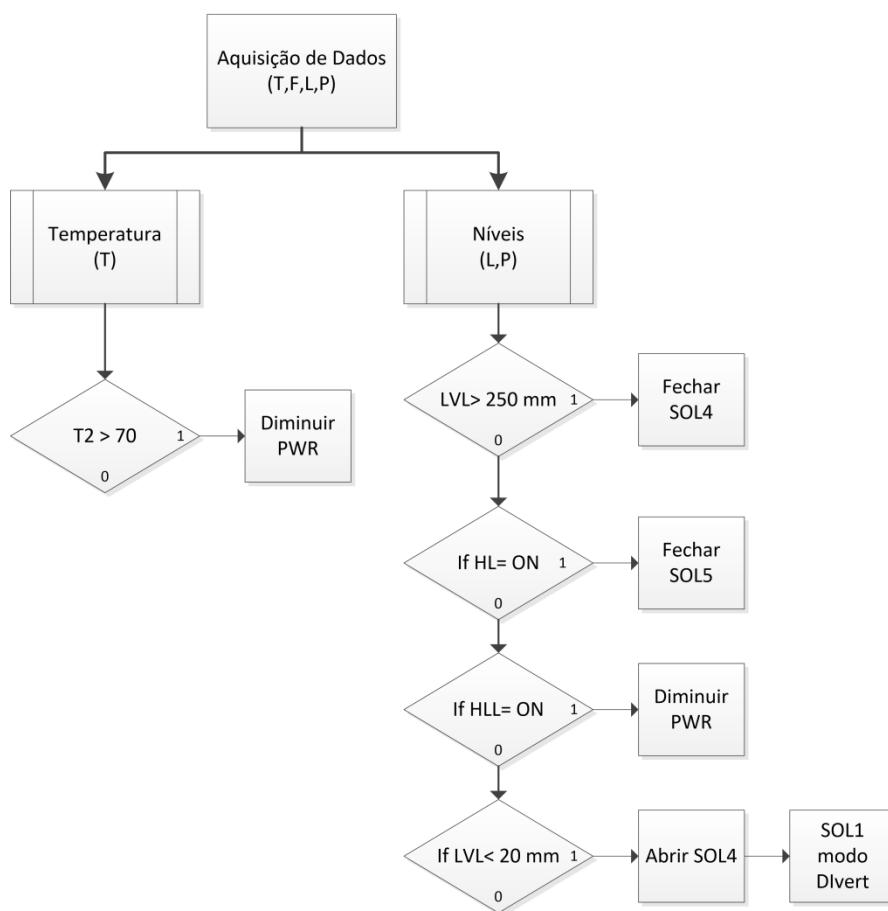


Figura 49 – Algoritmo dos protocolos de emergência programados para o CX9020

C.4 – Aspen Plus V7.3

O Aspen Plus V7.3, doravante denominado apenas de Aspen, é um simulador usado para o desenho, simulação, modelação e otimização de processos químicos de vários ramos da indústria. Devido às suas valências e potencialidades, o Aspen é uma excelente ferramenta quer para um profissional devidamente treinado quer para um aluno em formação. No âmbito do desenho da atividade experimental de recuperação de solventes procedeu-se à simulação da operação de destilação fazendo uso do módulo BatchSep. Na Figura 50 encontra-se representado o diagrama de processo para a simulação efetuada, estando representado na Tabela 13 os parâmetros usados no módulo BatchSep.

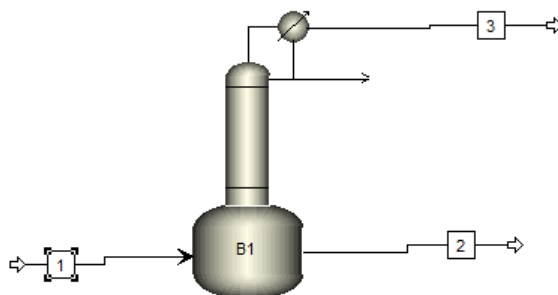


Figura 50 - Diagrama de Processo da simulação da coluna de destilação

Tabela 13 - Parâmetros usados no módulo BatchSep para a simulação da coluna de destilação

Configuração geral	Número de andares de equilíbrio	7³
	Fases válidas	Vapor-líquido-líquido
	Componente-chave da 2ª fase	Água
	Modelo termodinâmico	Unifac
	Condição inicial	Refluxo total
Configuração do reebulidor	Orientação	Vertical
	Geometria (base/topo)	Hemisférica/Hemisférica
	Altura (cm)	50
	Volume (cm ³)	2000
	Potência de aquecimento (W)	150
	Pressão (bar)	1.309 ⁴
Configuração do condensador	Tipo	Total
	Razão de refluxo	4
	Pressão (bar)	0,994

³ Inclui reebulidor, condensador e pratos da coluna⁴ Valor estimado para a pressão de vapor da mistura a 80.15 °C

D- Algoritmos de configuração do PLC

D.1 – Configuração do PLC no TwinCAT II

Para que seja possível elaborar um programa para ser corrido no PLC CX9020 da Beckhoff é necessário estabelecer a comunicação entre o PLC e um computador via TwinCAT. Para tal, é necessário seguir uma série de passos descritos de seguida

- **Deteção do PLC**

No módulo System Manager do TwinCAT, clicar na aba SYSTEM – Configuration que se encontra no lado esquerdo do ecrã e de seguida clicar na opção Choose Target. Este procedimento irá abrir uma nova janela com todos os dispositivos que façam uso de protocolos TCP/IP para comunicar. Na eventualidade de o PLC CX9020 não fazer parte dessa lista, seja por ser a primeira configuração ou por outro motivo, é necessário fazer uma busca pelo equipamento. Para tal, selecciona-se a opção Search Ethernet, seguida de Broadcast Search.

Da lista de dispositivos que aparecer, clique no equipamento que diz respeito ao PLC, e certifique-se que na parte inferior das janelas estão seleccionadas as seguintes opções: Address Info → IP Address; Target Route → Static; Remote Route → Static. Finalmente, basta clicar na opção Add Route. Irá aparecer uma janela de autenticação pedindo um username e uma password, sendo que o username é Administrator e a password é o campo vazio⁵.

Se o PLC não aparecer na lista de dispositivos siga os seguintes passos:

- Desligar e ligar novamente o PLC;
- Retirar e recolocar o cabo ethernet;
- Faça uma nova pesquisa para verificar se o equipamento já foi detetado;

⁵ Válido para os sistemas que corram o Windows CE como é o caso do PLC CX9020. No caso do PLC correr uma versão Windows XP a password é “1”.

- Se ainda não foi possível estabelecer a comunicação vá até ao painel de controlo e de seguida a Rede e Internet (o termo depende da versão do OS usado) e procure pela Conexão Local. De seguida vá às propriedades da ligação e verifique se a conexão está ativa. Se não estiver ativa, ative a ligação e volte a fazer uma nova pesquisa;
- Se o equipamento continuar indetetável, vá novamente às propriedades de conexão local e verifique se os protocolos TCP/IP estão ativos. De seguida clique em Propriedades para aceder à configuração do protocolo e verifique em todas as abas da janela se estão seleccionadas as opções “Obter um endereço de IP automaticamente” e “Endereço de IP Privado automático”. Para testar se a configuração foi bem efetuada, abra a janela de comandos (Executar → cmd) e digite o comando “ipconfig”. Se tudo correu bem deve aparecer uma referência à ligação. Volte a fazer uma nova pesquisa;
- Se mesmo após estes passos não for possível detetar o PLC, reinicie o computador e repita os passos anteriores.

Após a deteção do PLC, é necessário proceder à deteção das cartas que estão ligadas ao equipamento, sendo que para tal é preciso garantir que o *software* TwinCAT está no modo de configuração (Shift+F4). No lado direito da janela principal do Twincat, escolha a opção I/O Configuration e expanda o menu hierárquico até tornar visível a opção I/O Devices. Clique com o botão direito do rato e escolha o comando **Scan Devices**.irá aparecer a opção **Scan for Boxes e Free Run** e aceite as duas opções.

Se tudo correu bem, neste momento o computador já reconheceu o PLC e todas as cartas a ele associadas.

- **Criação de Projetos**

Para que seja possível a leitura e manipulação dos sinais recebidos nas cartas de aquisição do PLC é necessário que haja um mapeamento das entradas e saídas de sinais e a sua associação a uma variável de um programa. Nesse programa, para além da definição de variáveis, encontram-se todos os comandos declarados que o PLC deve executar durante o seu funcionamento, sendo que a sua criação é feita no módulo PLC Control do Twincat II.

Ao criar um novo programa é preciso selecionar o tipo de processador que o PLC usa, sendo que no caso do modelo CX9020 é usado um processador de arquitetura ARM. Na janela seguinte é pedido ao utilizador que introduza o nome do projeto, que escolha o tipo de projeto a criar (programa, função ou bloco de funções) e linguagem a ser usada.

O passo seguinte é fazer uma declaração de variáveis que corresponderão às várias conexões associadas às cartas de aquisição, sendo que é preciso ter em atenção que o tipo de variável (numérica, booleana...) deve ser compatível com o tipo de conexão correspondente. É recomendado que se use algum tipo de padrão na nomenclatura para que seja possível identificar e relacionar rapidamente as variáveis.

Para que o programa fique operacional é ainda necessário que seja guardado e depurado através do comando Rebuild All e que seja enviado para a memória do PLC. Para tal é necessário ativar a comunicação com o controlador através da opção LOGIN ou premindo a tecla F11. No caso de não existir nenhum programa na memória ou o programa existente seja diferente do que pretendemos enviar, aparecerá uma janela a perguntar ao utilizador se deseja fazer Download do programa para o PLC.

D.2 – Comunicação entre LabView e TwinCAT

- **Configuração de Servidor OPC**

Para que seja possível a comunicação entre o LabView e o TwinCAT é necessário que seja configurado um servidor OPC, sendo que nesta opção foi usado o servidor NI OPC-UA 12 que faz parte integrante do LabView. Os passos necessários para a configuração são então os seguintes:

A) Criação de um novo canal

Para se criar um novo canal é necessário clicar com o botão direito do rato na região do topo do lado esquerdo do painel de configuração do servidor. Esta ação irá chamar um assistente de configuração que torna o processo mais simples. Seguidamente é necessário renomear o canal e escolher o tipo de driver a atribuir. Neste caso como se está a utilizar um PLC da marca Beckhoff o tipo de driver será “Beckhoff TwinCAT”. No passo seguinte será perguntado qual o adaptador de rede em que o PLC se encontrará ligado, sendo que se

pode escolher a opção por defeito. Por fim será perguntado alguns parâmetros acerca da escrita de informação neste canal que podem ser deixados na configuração por defeito.

B) Criação de um novo dispositivo

Após a configuração de um novo canal de comunicação é necessário adicionar os dispositivos usados. Para tal é necessário escolher a opção “Click to add device” que se encontra abaixo do canal criado. Seguidamente é necessário renomear o dispositivo e atribuir um modelo (TwinCAT PLC). No passo seguinte é perguntado qual o ID (AMS Net ID) do dispositivo e que pode ser encontrado no módulo “System Manager” do TwinCAT II. Nos dois passos podem-se configurar os *timings* de comunicação, sendo que as opções por defeito são funcionais. Seguidamente é perguntado como é efetuada a criação de base de dados sendo que se deve escolher a opção “Generate on first startup” deixando as restantes por defeito. Nos restantes passos serão perguntados os parâmetros de projeto de PLC, nomeadamente a porta de projeto (pode ser vista na aba PLC – Configuration do módulo “System Manager” do TwinCAT), o tipo de dados utilizados (pode ser escolhida a opção “Word” ou “DWord”) e o tipo de importação, sendo que se deve escolher a opção “Upload from device” deixando as restantes opções nos seus parâmetros por defeito.

• **Configuração do projeto no LabView**

No gestor do projeto do programa criado é necessário adicionar o novo canal configurado no servidor OPC. Para tal é necessário clicar com o botão direito do rato na opção “My Computer” e escolher “New: I/O Server”. Na lista de opções que surge deve-se escolher a opção “OPC Client”. Após esta ação irá surgir uma janela onde se deverá escolher o servidor “National Instruments.NIOPCServers.V5” com um update rate de 200 milissegundos deixando as restantes opções na sua configuração por defeito.

Posto isto, falta apenas fazer a ligação entre as variáveis criadas no programa do PLC e o LabView. Para que isso seja possível, é necessário importar as variáveis para a biblioteca gerada aquando a adição do servidor OPC. A importação pode ser efetuada através da opção “New: Variable” da biblioteca. Ao selecionar a opção irá surgir uma janela de configuração da variável, onde se deve atribuir um nome e uma ligação através da ativação da opção “Enable Aliasing”. Para que a ligação seja validada é necessário que se procure pela variável no projeto do PLC através da opção “Browse”. Em condições normais as

variáveis encontrar-se-ão no endereço My Computer\Libreria\Servidor OPC\Canal OPC\PLC\Programa PLC.

Após a importação e configuração de todas as variáveis, a sua adição a um programa de LabView pode ser efetuada através da opção “Create: Shared Variable Node” existente no editor de diagrama de blocos do programa.

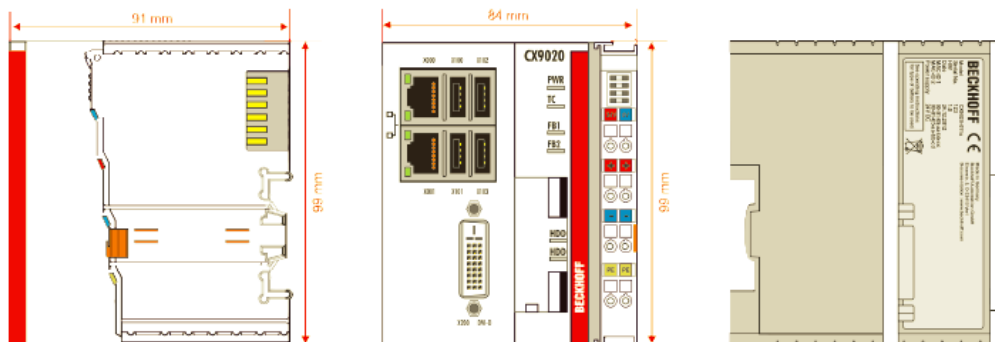
E – Especificações técnicas

E.1 – Módulo CPU Beckhoff CX9020

BECKHOFF

Product overview

2.3 CX9020 Technical data

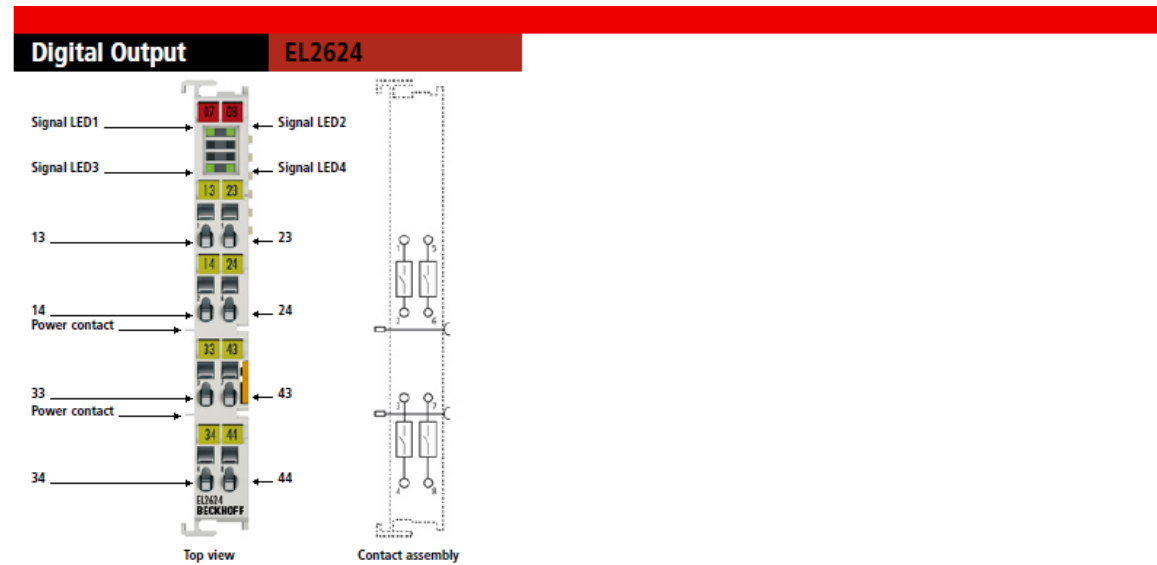


The basic configuration of the CX9020 includes a 256 MB μ SD Flash card. The basic configuration includes two Ethernet RJ-45 interfaces (connected via the internal switch), four USB 2.0 interfaces and a DVI-D interface.

Technical Data	CX9020
Processor	ARM Cortex™-A8, 1 GHz
Internal Flash memory	256 MB MicroSD (optional expandable), 2 x MicroSD card slot
Internal main memory	1 GB DDR3 RAM
Persistent memory	128 kB NOVRAM integrated
UPS	1-Sekunden-UPS integrated (optional)
Interfaces	2 x RJ 45 (Ethernet, internal Switch), 10/100 MBit/s, DVI-D, 4 x USB 2.0, 1 x optional interface
Diagnostics LED	1 x power, 1 x TC status, 2 x bus status, 2 x flash access
Clock	Internal clock with battery backup for time and date (battery replaceable)
Operating system	Microsoft Windows Embedded Compact 7
Control software	TwinCAT 2 PLC runtime or TwinCAT 2 NC PTP runtime
Power supply	24 V DC (-15 %/+20 %)
Current supply	I/O terminals 2 A
Max. power loss	5 W (including system interfaces)
Dielectric strength	500 Veff (supply/internal electronics)
Dimensions (H x W x D)	84 mm x 99 mm x 91 mm
Dimensions (H x W x D)	approx. 590 g
Operating/storage temperature	-25° C ... +60° C / -40° C ... +85° C
Relative humidity	95 % no condensation
Vibration/shock resistant	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27/ 29
EMC immunity/emission	conforms to EN 61000-6-2 / EN 61000-6-4
Protection class	IP 20

Further Information: www.beckhoff.de/CX9020

E.2 – EL2624

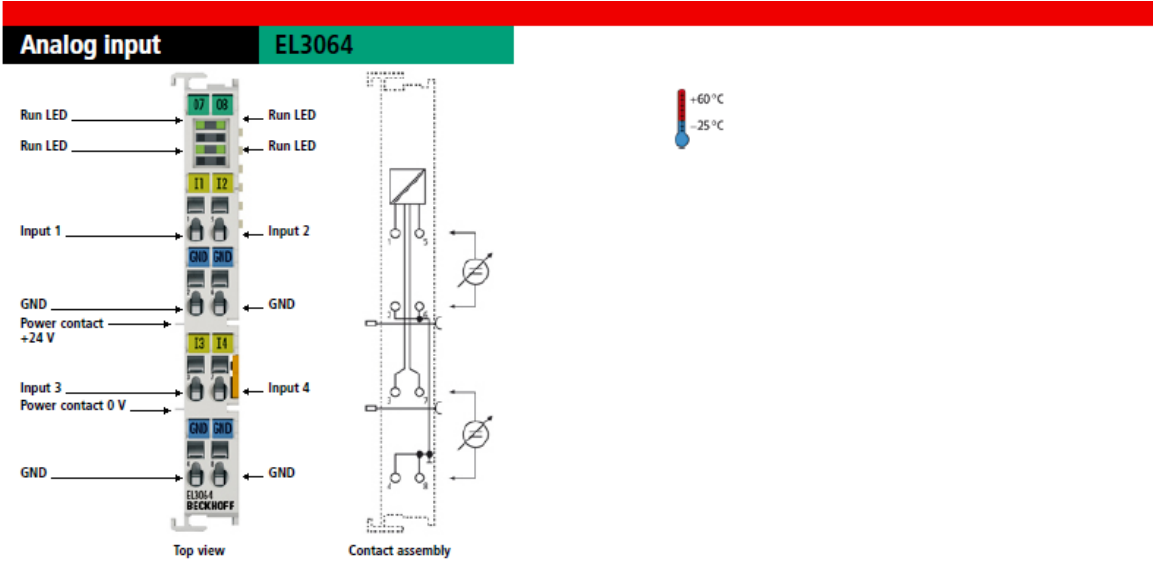


EL2624 | 4-channel relay output terminal 125 V AC/30 V DC

The EL2624 output terminal has four relays each of which has a single contact. The relay contact is suitable for use up to 125 V AC or 30 V DC. The EtherCAT Terminal indicates its signal state by means of light emitting diodes. The EL2624 has potential-free contacts. The power contacts are looped through.

Technical data	EL2624 ES2624
Connection technology	relay output
Number of outputs	4 x make contacts
Rated load voltage	125 V AC/30 V DC
Load type	ohmic
Distributed clocks	–
Ohmic switching current	0.5 A AC/2 A DC
Inductive switching current	no data
Minimum permitted load	10 µA at 10 mV DC with intact contact coating
Current consumption E-bus	typ. 200 mA
Electrical Isolation	500 V (E-bus/field potential)
Current consumption power contacts	–
Bit width in the process image	4 outputs
Operating cycles mech. (mln.)	1 x 10 ⁸
Operating cycles electr. (mln.)	2 x 10 ⁵ (1 A/30 V DC)
Configuration	no address or configuration setting
Weight	approx. 50 g
Operating/storage temperature	0...+55 °C/-25...+85 °C
Relative humidity	95 %, no condensation
Vibration/shock resistance	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC immunity/emission	conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Protect. class/Installation pos.	IP 20/variable
Pluggable wiring	for all ESxxxx terminals
Approvals	CE

E.3 – EL3064

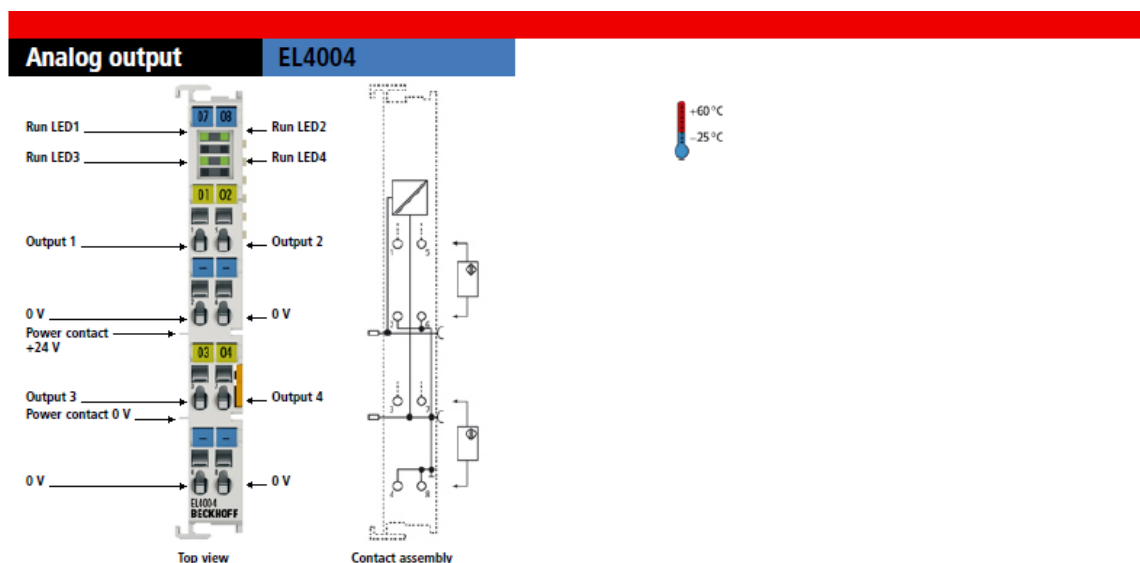


EL3064 | 4-channel analog input terminal 0...10 V, single-ended, 12 bit

The EL3064 analog input terminal processes signals in the range between 0 and 10 V. The voltage is digitised with a resolution of 12 bits and is transmitted (electrically isolated) to the higher-level automation device. The EL3064 EtherCAT Terminal features 2-wire conductors for the four single-ended inputs with a common internal ground potential. The power contacts are connected through. The signal state of the EtherCAT Terminal is indicated by light emitting diodes.

Technical data	EL3064 ES3064
Number of Inputs	4 (single-ended)
Power supply	via the E-bus
Technology	single-ended
Signal voltage	0...10 V
Distributed clocks	–
Internal resistance	> 130 kΩ
Input filter limit frequency	1 kHz
Conversion time	0.625 ms default setting, configurable
Resolution	12 bit (16 bit presentation, incl. sign)
Measuring error	< ±0.3 % (relative to full scale value)
Electrical Isolation	500 V (E-bus/signal voltage)
Current consumption power contacts	–
Current consumption E-bus	typ. 130 mA
Dielectric strength	max. 30 V
Bit width in the process image	inputs: 16 byte
Special features	activatable FIR/IIR filters, limit value monitoring
Weight	approx. 60 g
Operating/storage temperature	-25...+60 °C/-40...+85 °C
Relative humidity	95 %, no condensation
Vibration/shock resistance	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC immunity/emission	conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Protect. class/Installation pos.	IP 20/variable
Pluggable wiring	for all ESxxxx terminals
Approvals	CE, UL, Ex

E.4 – EL4004

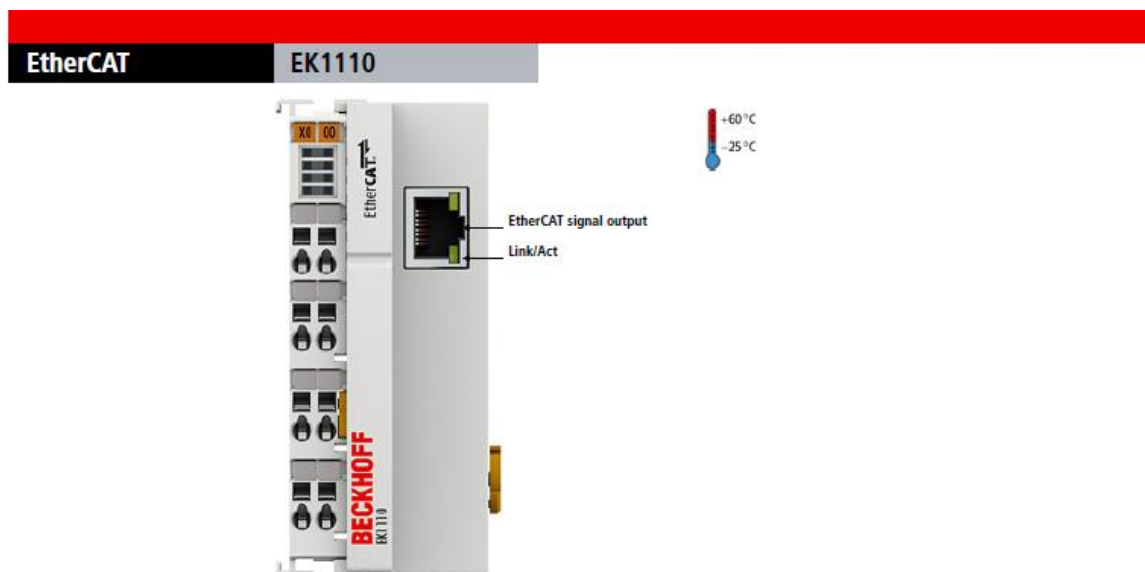


EL4004 | 4-channel analog output terminal 0...10 V, 12 bit

The EL4004 analog output terminal generate signals in the range between 0 and 10 V. The voltage is supplied to the process level with a resolution of 12 bits and is electrically isolated. The output channels of the EtherCAT Terminal have a common ground potential. The EL4004 has four channels. The output stages are powered by the 24 V supply. The signal state of the EtherCAT Terminal is indicated by light emitting diodes.

Technical data	EL4004 ES4004
Connection technology	2-wire, single-ended
Number of outputs	4
Power supply	24 V DC via power contacts
Signal voltage	0...10 V
Distributed clocks	yes
Distributed clock precision	<< 1 μ s
Load	> 5 k Ω (short-circuit-proof)
Output error	< 0.1 % (relative to end value)
Resolution	12 bit
Electrical isolation	500 V (E-bus/signal voltage)
Conversion time	~ 250 μ s
Current consumption power contacts	typ. 25 mA
Current consumption E-bus	typ. 140 mA
Bit width in the process image	4 x 16 bit AO output
Special features	Optional watchdog: user-specific output value with ramp; user synchronisation can be activated.
Weight	approx. 85 g
Operating/storage temperature	-25...+60 °C/-40...+85 °C
Relative humidity	95 %, no condensation
Vibration/shock resistance	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC immunity/emission	conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Protect. class/installation pos.	IP 20/variable
Pluggable wiring	for all ESxxxx terminals
Approvals	CE, UL, Ex

E.5 – EK1001



EK1110 | EtherCAT extension

Like the E-bus end terminal, the EK1110 EtherCAT extension is connected to the end of the EtherCAT Terminal block. The terminal offers the option of connecting an Ethernet cable with RJ 45 connector, thereby extending the EtherCAT strand electrically isolated by up to 100 m. In the EK1110 terminal, the E-bus signals are converted on the fly to 100BASE-TX Ethernet signal representation. Power supply to the EK1110 electronics is via the E-bus. No parameterisation or configuration tasks are required.

Technical data	EK1110
Task within EtherCAT system	conversion of the E-bus signals to 100BASE-TX Ethernet for extension of the EtherCAT network
Data transfer medium	Ethernet/EtherCAT cable (min. CAT 5), shielded
Distance between stations	100 m (100BASE-TX)
Protocol	any EtherCAT protocol
Delay	approx. 1 µs
Data transfer rates	100 Mbaud
Configuration	not required
Bus Interface	1 x RJ 45
Power supply	from E-bus
Current consumption E-bus	typ. 130 mA
Electrical Isolation	500 V (supply voltage/Ethernet)
Weight	approx. 50 g
Operating/storage temperature	-25...+60 °C/-40...+85 °C
Relative humidity	95 %, no condensation
Vibration/shock resistance	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC immunity/emission	conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Protect. class/Installation pos.	IP 20/variable
Approvals	CE, UL, Ex

E.6 – Fonte de alimentação

A fonte de alimentação escolhida deve preencher uma série de requisitos para que possa ser aplicada no PLC. A nível de tensão, é recomendada uma fonte de alimentação de 24V de corrente contínua para o módulo CPU, no entanto são tolerados valores entre 20.4VDC e 28.8VDC. A nível de intensidade, o seu valor pode ser estimado através das especificações técnicas dos módulos EtherCAT que se encontram resumidas na Tabela

Tabela 14 - Potência requerida por cada módulo EtherCAT

Módulo EtherCAT	Quantidade de módulos	Corrente requerida⁶ (unidade/total) mA
EL3064	3	130/390
EL4004	1	140/140
EL2624	2	200/400
EK1110	1	130/130
	Total	1060

Assumindo que a eficiência de uma fonte de alimentação típica para estes sistemas apresenta uma eficiência média de 85% a 25 °C e que a potência média de um CPU ARM é de apenas 500 mW [42], seria então necessária uma fonte de alimentação com um amperagem mínima de aproximadamente 1300 mA. Perante estes requisitos foi escolhida a fonte de alimentação MeanWell® MDR-100-24. De seguida é apresentada a ficha com as especificações técnicas da fonte de alimentação [43].

⁶ Assumindo uma operação em condições padrão e que todas as ligações se encontram em uso



96W Single Output Industrial DIN Rail Power Supply

MDR-100 series



■ Features :

- Universal AC input / Full range
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temperature
- ZCS/ZVS technology to reduce power dissipation
- Cooling by free air convection
- Can be installed on DIN rail TS-35/7.5 or 15
- DC OK relay contact
- No load power consumption < 1W
- LED indicator for power on
- 100% full load burn-in test
- 3 years warranty



SPECIFICATION

SPECIFICATION				
MODEL		MDR-100-12	MDR-100-24	MDR-100-48
OUTPUT	DC VOLTAGE	12V	24V	48V
	RATED CURRENT	7.5A	4A	2A
	CURRENT RANGE	0 ~ 7.5A	0 ~ 4A	0 ~ 2A
	RATED POWER	90W	96W	96W
	RIPPLE & NOISE (max.) <small>Note.2</small>	120mVp-p	150mVp-p	200mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	12 ~ 15V	24 ~ 30V	48 ~ 56V
	VOLTAGE TOLERANCE <small>Note.3</small>	± 1.0%	± 1.0%	± 1.0%
	LINE REGULATION	± 1.0%	± 1.0%	± 1.0%
	LOAD REGULATION	± 1.0%	± 1.0%	± 1.0%
INPUT	SETUP, RISE TIME <small>Note.5</small>	3000ms, 50ms/230VAC 3000ms, 50ms/115VAC at full load		
	HOLD UP TIME (Typ.)	50ms/230VAC 20ms/115VAC at full load		
	VOLTAGE RANGE <small>Note.6</small>	85 ~ 264VAC	120 ~ 370VDC	
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz		
	POWER FACTOR (Typ.)	PF≥0.95/230VAC PF≥0.98/115VAC at full load		
	EFFICIENCY (Typ.)	85%	86%	88%
	AC CURRENT (Typ.)	1.3A/115VAC 0.8A/230VAC		
PROTECTION	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 30A/115VAC 60A/230VAC		
	LEAKAGE CURRENT	<1mA / 240VAC		
	OVERLOAD	105 ~ 150% rated output power Protection type : Constant current limiting, recovers automatically after fault condition is removed		
FUNCTION	OVER VOLTAGE	15.6 ~ 18V	31.2 ~ 36V	57.6 ~ 64.8V
	OVER TEMPERATURE	Shut down o/p voltage, auto-recovery or re-power on to recover		
	DC OK SIGNAL	Relay contact rating(max.): 30V/1A resistive		
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-10 ~ +60°C (Refer to "Derating Curve")		
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing		
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH		
	TEMP. COEFFICIENT	± 0.03%/°C (0 ~ 50°C)		
	VIBRATION	Component : 10 ~ 500Hz, 2G 10min./1cycle, period for 60min. each along X, Y, Z axes ; Mounting : Compliance to IEC60068-2-6		
SAFETY & EMC (<small>Note.4</small>)	SAFETY STANDARDS	UL508, TUV EN60950-1 approved		
	WITHSTAND VOLTAGE	I/P-O/P:3KVAC I/P-FG:2KVAC O/P-FG:0.5KVAC		
	ISOLATION RESISTANCE	I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG>100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH		
	EMC EMISSION	Compliance to EN55011, EN55022 (CISPR22), EN61204-3 Class B, EN61000-3-2,-3		
OTHERS	EMC IMMUNITY	Compliance to EN61000-4-2,3,4,5,6,8,11, EN55024, EN61000-6-2, EN61204-3, heavy industry level, criteria A		
	MTBF	346K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)		
	DIMENSION	55*90*100mm (W*H*D)		
NOTE	PACKING	0.42Kg; 30pcs/13.6Kg/0.82CUFT		
	1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uF & 47uF parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 5. Length of set up time is measured at first cold start. Turning ON/OFF the power supply may lead to increase of the set up time. 6. Deating maybe needed under low input voltages, please check the derating curve for more detail.			

File Name:MDR-100-SPEC 2013-11-26

E.7 – Adaptador IDC50 para CX9020

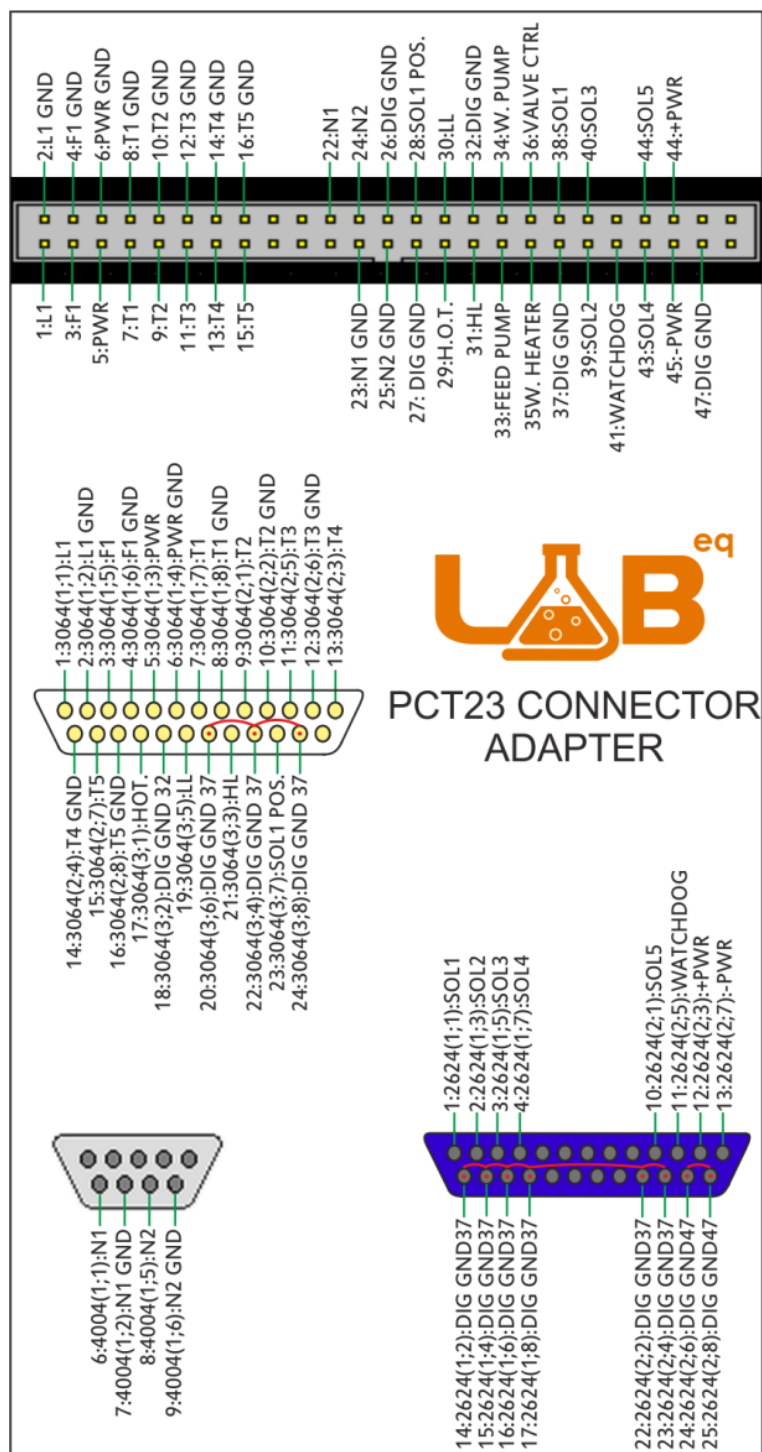


Figura 51 – Diagrama de correspondências entre conector IDC50 e conectores de comunicação com CX9020

F – Terminologia usada em contexto de Instrumentação e Controlo

À semelhança do que acontece com várias áreas tecnológicas e do conhecimento, existe uma terminologia própria associada à instrumentação e controlo que deve ser do domínio de um operador. De seguida é apresentado um pequeno glossário de termos que tenta introduzir e caracterizar alguns termos comumente usados na aplicação de instrumentos e sistemas de controlo em processos físicos e químicos.

Sensor – equipamento capaz de responder a um estímulo de natureza física e/ou química de uma forma que possa ser mensurável. Um sensor não mede determinada grandeza física (temperatura, pressão, entre outros) de uma forma direta, mas regista normalmente uma grandeza mecânica e/ou elétrica que pode ser devidamente quantificada e relacionada com a grandeza física através de uma **calibração**. Por exemplo, um termopar é usado para medir temperaturas, mas o output de um termopar é uma tensão que posteriormente pode ser convertida a um valor de temperatura.

Sinal medido – devido à natureza do seu funcionamento, um sensor não mede diretamente uma propriedade mas sim uma grandeza mecânica e/ou elétrica (p.e. deslocamento, tensão, amperagem, resistência) à qual se pode fazer corresponder uma grandeza física (p.e., temperatura, pressão, pH, etc). A correspondência do sinal medido com a grandeza física correspondente é efetuada recorrendo a uma **calibração**.

Calibração – A calibração é um aspeto importante para estabelecer uma relação entre a grandeza física medida e a resposta do sensor, e é normalmente determinada em ensaios onde se fazem testes usando amostras cujas propriedades são devidamente conhecidas ou através da alteração controlada de parâmetros processuais (temperatura, pressão entre outros). Devido a efeitos de desgaste e fadiga dos sensores que podem sofrer alteração com o uso e a necessidade de garantir a validação dos resultados dos parâmetros medidos poderá ser necessário proceder à recalibração do equipamento [44].

Sensibilidade – a sensibilidade de um sensor pode ser definida como a mudança na resposta de um sensor perante uma mudança no parâmetro medido. A sensibilidade é um parâmetro bastante importante uma vez que influencia diretamente a aplicabilidade de determinado sensor face a outro, ou mesmo o tipo de equipamento que se deve

implementar. Por exemplo, se estivermos perante uma situação onde uma pequena variação de concentração de um contaminante pode colocar em risco a qualidade de um produto, o sensor usado deve possuir uma sensibilidade ou ganho elevados de maneira a que a variação da sua resposta seja suficientemente notória para que possa ser perceptível.

Resolução – incremento mínimo no parâmetro medido que pode ser detetado na resposta do sensor. Este parâmetro possui uma elevada importância e está muitas vezes associado à sensibilidade do sensor.

Gama de deteção – gama de valores que o sensor consegue medir desde o valor mínimo de deteção (**limite mínimo de deteção**) até ao valor máximo de deteção, sendo que esta gama é diretamente dependente de limitações físicas e/ou eletrónicas do material.

Limite de deteção – valor mínimo a ser medido por um sensor e que pode ser definido como diferente de outros valores registados dentro de um intervalo de confiança. Sabendo que existe sempre uma incerteza associada ao valor medido por um sensor, a maneira mais aceite de quantificar o limite de deteção é como sendo o valor que excede três vezes o valor do desvio padrão do sinal obtido num ensaio com um “branco” [45].

Precisão – a precisão de um sensor está associada à reprodutibilidade das medições numa mesma condição bem definida e que pode ser medida em ensaios que podem ser consecutivos ou não.

Exatidão – a exatidão de um sensor está associada ao desvio entre o valor indicado pelo sensor e o valor real. Este termo é largamente confundido com a **Precisão**, sendo que a maneira mais simples de distinguir os dois termos é através da analogia com o tiro ao arco: um arqueiro que acerte sempre no mesmo sítio (seja ele qual for) é um arqueiro que é **Preciso**; O que acerta mais vezes numa área perto do centro é um arqueiro **Exato** (Figura 52).

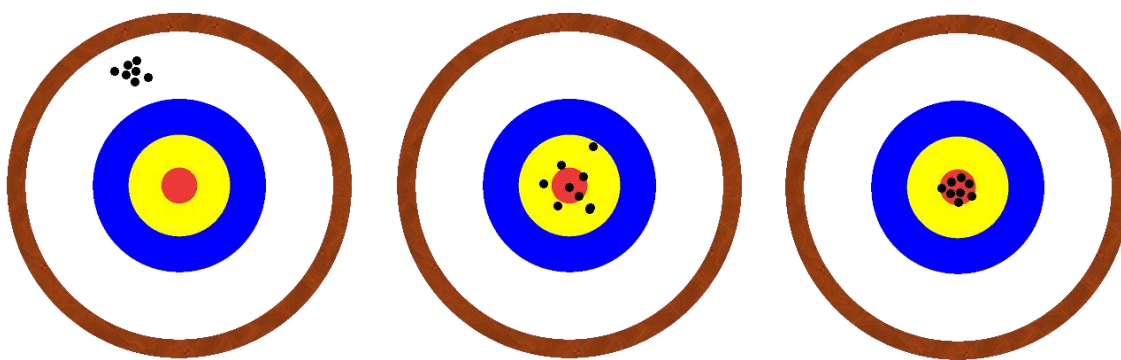


Figura 52 - Comparação entre Precisão e Exatidão com a analogia do tiro ao arco

Offset do sensor – desvio apresentado pelo face ao valor real da variável. Este desvio é considerado como um erro de início de escala e que se mantém constante dentro da gama de deteção sem que haja progressão do mesmo [46]. Por exemplo, se para um determinado fluido um termopar registasse, dentro de uma gama de temperaturas representativa, um desvio constante de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à temperatura, o offset do sensor seria de $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sendo que se poderia subtrair esse valor a todas temperaturas medidas dentro da gama testada a fim de se obter um valor exato, ou então alterar a **Calibração** do sensor.

Set-Point – em controlo, o set-point ou valor pré-estabelecido diz respeito a um valor de objetivo para determinado parâmetro, sendo que todas as ações de controlo tomadas serão no sentido de atingir o valor de set-point.

Intervalo de controlo – no caso específico de instrumentação e controlo, este intervalo pode ser definido como um retardamento intencional na ação de controlo face a um desvio do **set-point**. Este conceito é bastante comum em equipamentos de controlo de válvulas, temperatura ou bombas, uma vez que anula uma eventual troca rápida de estados (em inglês: “*chattering*”) que pode danificar rapidamente o equipamento controlado.

Um exemplo prático é aquele que se verifica no controlo de nível de tanques. O nível de um tanque está frequentemente a mudar, sendo que normalmente é necessário garantir que este se encontre num determinado valor (**set-point**). Num funcionamento dito normal, um controlador tomaria uma ação de controlo quando o valor de nível fosse inferior ao set-point (abrir uma válvula, ligar uma bomba...) e uma ação contrária quando o valor fosse superior ao set-point (Figura 53). Em sistemas com um **tempo morto** e **tempo de resposta**

bastante reduzidos, isto implicaria que o controlador estaria a tomar várias ações de controlo num espaço de tempo bastante reduzido, e que no caso de bombas ou válvulas se traduz num desgaste rápido do equipamento, sendo por isso necessário definir um intervalo de controlo com limites bem definidos, e onde nos quais se irá tomar uma ação de controlo retardada.

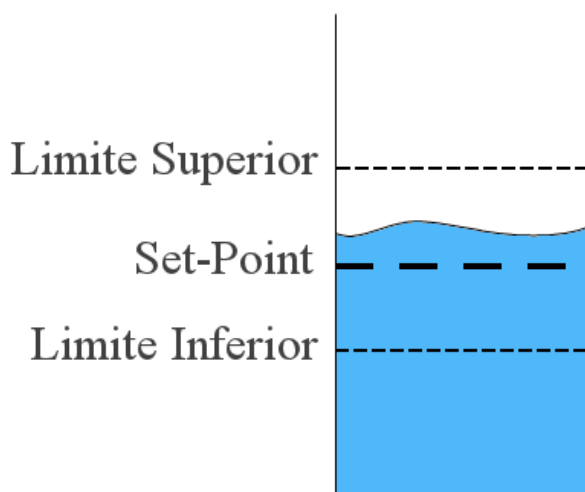


Figura 53 - Limites no controlo de nível de um tanque

Tempo morto – o tempo morto ou tempo de transporte pode ser definido como o intervalo de tempo entre o momento em que uma ação é tomada e o momento em que se registam as consequências associadas à ação tomada. Um exemplo ilustrativo é o de uma mangueira de jardim, em que se pode definir como tempo morto o instante entre o fecho da torneira até ao ponto em que o caudal à saída da mangueira diminui largamente até cessar.

Tempo de resposta – os sensores não são capazes de responder imediatamente a uma mudança no parâmetro medido, sendo que se define como tempo de resposta o intervalo entre uma mudança da variável medida até que o sensor transmita um sinal que corresponda a uma determinada percentagem (normalmente acima dos 95%) do sinal de resposta efetivo [47].

Taxa de amostragem – frequência de aquisição de dados por parte do equipamento e que pode ser quantificado no número de amostras por unidade de tempo. Este parâmetro possui uma importância elevada quando se trata de controlo digital ou na aquisição de dados por parte de um computador, já a taxa de amostragem deve ser suficientemente

elevada para que não haja uma perda significativa de informação (efeito de *Aliasing* tal como se pode verificar na Figura 54), mas não excessivamente alta para que haja uma elevada redundância de dados que possa causar um *overflow* de informação nos sistemas de processamento podendo causar a sua falha. Existem algumas regras heurísticas para se escolher uma taxa de amostragem, no entanto este passo continua a ser mais uma arte do que uma ciência [2].

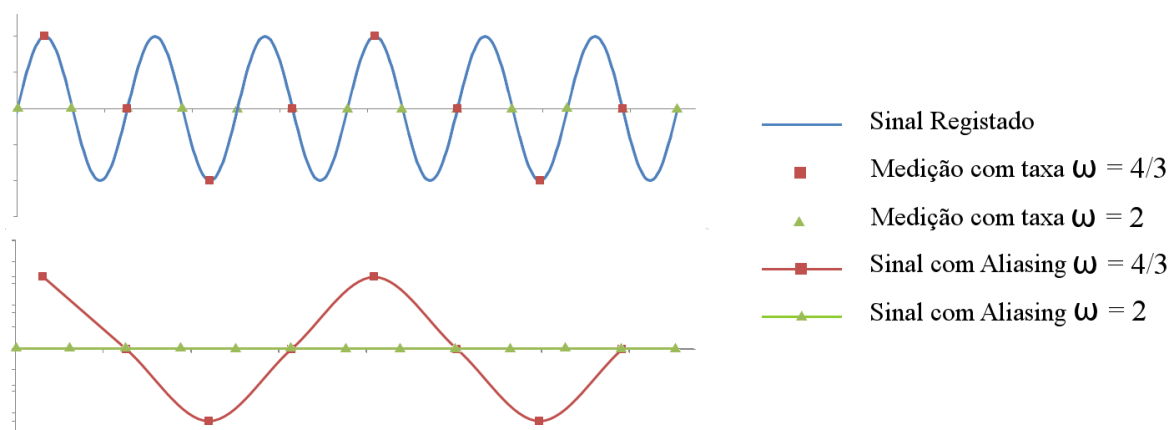


Figura 54 - Comparação entre sinal registado e sinal com *aliasing* para taxas de amostragem diferentes

Função de Transferência – uma função de transferência é uma representação matemática, normalmente descrita no domínio de Laplace, usada para descrever inputs e outputs de um determinado processo. Pode ser obtida através da linearização e transformação das equações de conservação ou através de um ajuste, normalmente em função do tempo ou no domínio da frequência [2].

Sinais Elétricos Analógicos – um sinal elétrico analógico é um sinal que, à semelhança de outros sinais analógicos, representa continuamente uma proporção em relação a uma outra variável temporal. Devido à sua natureza, um sinal analógico pode assumir qualquer valor dentro da sua amplitude.

Sinais Elétricos Digitais – um sinal elétrico digital apresenta uma analogia semelhante aos sinais digitais (semelhante ao caso dos **sinais elétricos analógicos**). Um sinal elétrico digital, ao contrário de um sinal analógico, apresenta uma discretização temporal e de amplitude, e por esse motivo apenas pode assumir um número finito de estados. A conversão de um sinal analógico em digital é possível através de um fenómeno chamado

digitalização de sinal analógico que envolve 3 passos: Amostragem do sinal (ver **taxa de amostragem**), quantização e codificação (Figura 55)

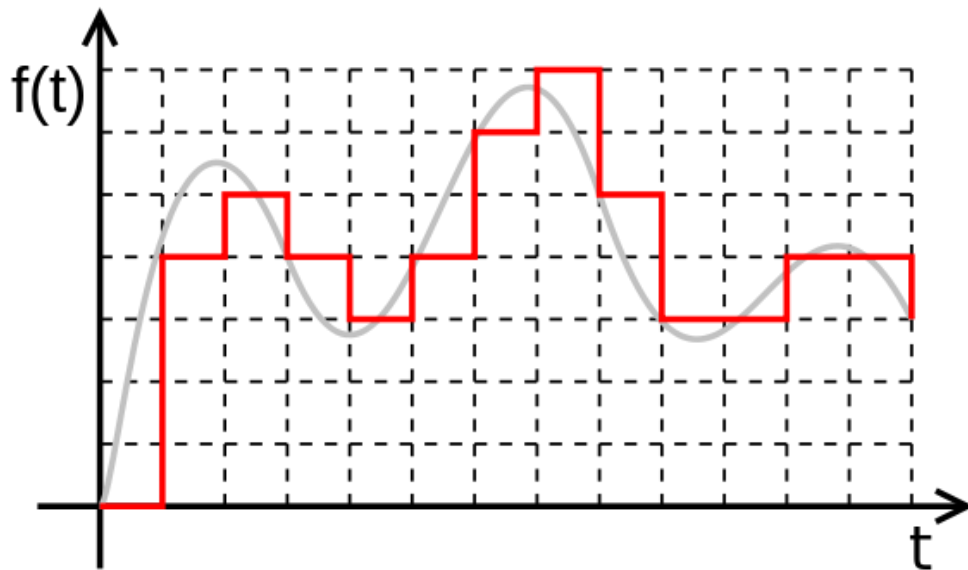


Figura 55 – Digitalização de um sinal analógico. Fonte: Petr Adamek [48]